

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт Кибернетики

Направление подготовки 15.04.06 Мехатроника и робототехника

Кафедра Систем управления и мехатроники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка и исследование компонентной модели стенда обезвешивания крыльев батарей солнечных при наземных испытаниях приводов их раскрытия

УДК 629.73.025.1:629.7.064.56

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ51	Майков Степан Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. СУМ	Воронин А.В.	к.т.н., доцент		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. Менеджмента	Конотопский В.Ю.	к.ЭКОН.Н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Пустовойтова М.И.	к.ХИМ.Н., доцент		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
СУМ	Губин В.Е.	к.т.н., доцент		

Томск – 2017 г.

## Запланированные результаты обучения по программе

Код рез-та	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные</i>		
P1	Применять глубокие естественно-научные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств, и систем, в том числе их систем управления.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-3, ОПК-1, ОПК-4, ОК-1, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких устройств и систем.	Требования ФГОС (ПК-3, ПК-4, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОК-1, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.1, 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	применять и интегрировать полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных мехатронных и робототехнических устройств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-15, ПК-18, ОПК-3, ОПК-6, ОК-1, ОК-5, ОК-6, ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации мехатронных и робототехнических модулей, устройств и Систем.	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-10, ПК-11, ПК-12, ПК-18, ОПК-4, ОПК-6, ОК-1, ОК-4, ОК-6, ОК-8), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических средств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием передового отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-6, ПК-13, ПК-17, ПК-18, ОПК-2, ОПК-3, ОК-1, ОК-3, ОК-4, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в мехатронике и робототехнике и знать области их применения, в том числе в автоматизированных производствах.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2 ПК-3, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-9, ОК-10), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Универсальные</i>		
P7	эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2 ПК-7, ПК-8, ПК-16, ПК-17,

	члена команды	ОК-1, ОК-2, ОК-4, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ПК-9, ПК-16, ОПК-4, ОК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	проявлять широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, демонстрировать понимание вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду	Требования ФГОС (ПК-5, ПК-8, ПК-15, ПК-16, ПК-18, ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОК-3, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEAN</i>
P10	следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ПК-8, ПК-11, ПК-16, ОПК-3, ОПК-6, ОК-4), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт кибернетики

Направление подготовки (специальность) 15.04.06 – Мехатроника и робототехника

Кафедра систем управления и мехатроники

УТВЕРЖДАЮ:

Заведующий кафедры СУМ

\_\_\_\_\_ Губин Е.В.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерская диссертация
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ51	Майков Степан Александрович

Тема работы:

Разработка и исследование компонентной модели стенда обезвешивания крыльев батарей солнечных при наземных испытаниях приводов их раскрытия	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 1399/с от 28.02.2017 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2017 г.
--	---------------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Описание испытываемых крыльев:                         <ul style="list-style-type: none"> <li>A1. Крыло БС изделия «Глонасс-К2» (712К2.0110-0).</li> <li>A2. Крыло БС КА платформы «Экспресс-2000» (795.0110-0).</li> </ul> </li> <li>Исходные данные на опытно-конструкторскую работу "Разработка, изготовление и испытания системы обезвешивания автоматизированной активной многоканальной" (774.ИД 345-0051-14).</li> <li>Техническое задание на составную часть ОКР «Разработка, изготовление и испытания системы обезвешивания автоматизированной активной многоканальной» (774.ТЗ345-3210-14).</li> <li>Matlab R2016a с предустановленными расширениями Simulink/SimScape Multibody.</li> </ul>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Сравнительный анализ типов моделирующих систем и математических моделей.</p> <p>Моделирование компонентной модели стенда обезвешивания крыльев батарей солнечных в условиях наземной эксплуатации.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Конотопский Владимир Юрьевич, к.э.н., доцент кафедры менеджмента</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Пустовойтова Марина Игоревна, к.х.н., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности</p>
<p>Раздел на иностранном языке</p>	<p>Бутакова Татьяна Ивановна, старший преподаватель кафедры иностранных языков института кибернетики</p> <p>Рудницкий Владислав Александрович, к.т.н., доцент кафедры систем управления и мехатроники</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Раздел 3: Проектирование компонентной модели крыла батареи солнечной «Экспресс-2000» в среде Matlab/Simulink/SimMechanics 2 Gen</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры СУМ	Воронин Александр Васильевич	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8EM51	Майков Степан Александрович		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт кибернетики  
 Направление подготовки 15.04.06 – Мехатроника и робототехника  
 Уровень образования – магистр  
 Кафедра систем управления и мехатроники  
 Период выполнения – весенний семестр 2016/2017 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2017 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.05.2017 г.	Основная часть	60
17.05.2017 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
17.05.2017 г.	Социальная ответственность	15
26.05.2017 г.	Раздел на иностранном языке	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. СУМ	Воронин Александр Васильевич	К.Т.Н., доцент		

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
СУМ	Губин Владимир Евгеньевич	К.Т.Н., доцент		

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа 119 с., 104 рис., 21 табл., 22 источников, 7 приложений.

Ключевые слова: космический аппарат, крылья батарей солнечных, наземные испытания, стенд обезвешивания, системы активного обезвешивания, продольная и поперечная каретки, следящие системы, математическое моделирование, математическая модель.

Объектом исследования является компонентная модель стенда обезвешивания крыла батареи солнечной типа «Экспресс-2000».

Целью диссертационной работы является разработка компонентной модели стенда обезвешивания, позволяющей проводить отработку раскрытия крупногабаритных космических конструкций, в частности крыла батареи солнечной космического аппарата типа «Экспресс-2000» при наземных испытаниях.

Моделирование осуществлялось при помощи пакета прикладных программ Matlab версии R2016a, с расширениями Simulink/SimScape Multibody, а также САПР Autodesk Inventor и SolidWorks.

Полученные результаты планируется использовать для оптимизации алгоритмов управления подвесов, представляющих собой систему следящих кареток, а также требований к характеристикам применяемых на стенде измерительных и исполнительных устройств.

Степень внедрения: высокая; проект может использоваться в настоящее время, при продолжении дальнейших исследований и доработок.

Область применения: космическая промышленность.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

## **Определения, обозначения, сокращения и нормативные ссылки**

ВКР – выпускная квалификационная работа;

КБС – крыло солнечной батареи;

НИР – научно-исследовательская работы;

САПР – система автоматизированного проектирования;

CAD – computer-aided design;

ШУ – шарнирное устройство;

САС НТ – система автоматической стабилизации натяжения троса;

ЭВМ – электронная вычислительная машина;

ЦВМ – цифровая вычислительная машина;

ПК – персональный компьютер;

ТЗ – техническое задание;

ОКР – опытно конструкторская работа;

ММ – математическая модель;

БС – батарея солнечная;

МУ БС – механическое устройство батареи солнечной;

СОА – активная система обезвешивания;

ДС – датчик силы;

ДУ – датчик угла;

НИИ – научно-исследовательский институт;

СК – система координат;

КТИ НП – конструкторско-технологический институт научного приборостроения;



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	11
1 Обзор литературы	14
2 Объект и методы исследования	25
3 Проектирование компонентной модели крыла батареи солнечной «Экспресс-2000» в среде Matlab/Simulink/SimMechanics 2 Gen	29
3.1 Проектирование моделей основных элементов кинематических схем крыльев солнечных батарей	30
3.2 Модель штанги	36
3.3 Корневая панель	38
3.4 Третье шарнирное устройство	40
3.5 Промежуточная и боковые панели	41
3.6 Четвёртое шарнирное устройство	43
3.7 Концевая панель	44
3.8 Итоговая модель	44
4 Проектирование системы продольной и поперечной кареток в составе подвеса стенда обезвешивания	46
4.1 Подготовка и упрощение модели продольной каретки	46
4.2 Конвертация составляющих продольной каретки в Simulink	49
5 Объединение моделей крыла батареи солнечной и системы продольной и поперечной кареток	52
5.1 Создание шаблона модели стенда обезвешивания крыла	52
5.1.1 Формирование неполной модели крыла	52
5.1.2 Внесение системы продольной и поперечной кареток	53
5.1.3 Назначение блоков объединённой модели	54
5.1.4 Система слежения	57
5.2 Объединение итоговой модели крыла батареи солнечной типа «Экспресс-2000», подвеса и следящей системы	60
5.2.1 Внедрение итоговой модели крыла	60
5.2.2 Внедрение системы продольных и поперечных кареток	64
5.2.3 Внедрение следящей системы	70
5.2.4 Внедрение модели троса	72
5.2.5 Внедрение блока расчёта отклонения троса от вертикали	75
5.2.6 Блок сухого и вязкого трения	76
5.2.7 Результаты моделирования объединённой модели стенда обезвешивания	77
5.3 Расчёт энергетики стенда	82
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	89
6.1 Организация и планирование работ	89
6.2 Расчёт сметы затрат на выполнение проекта	91
6.2.1 Расчёт затрат на материалы	92
6.2.2 Расчёт заработной платы	92
6.2.3 Расчёт затрат на социальный налог	93
6.2.4 Расчёт затрат на электроэнергию	94

6.2.5	Расчёт амортизационных расходов	95
6.2.6	Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов	95
6.2.7	Расчёт прочих расходов	96
6.2.8	Расчёт общей себестоимости разработки	96
6.2.9	Расчёт прибыли	97
6.2.10	Расчёт НДС	97
6.2.11	Цена разработки НИР	97
6.3	Оценка экономической эффективности проекта	97
6.3.1	Определение срока окупаемости	97
6.3.2	Оценка научно-технического уровня НИР	98
7	Социальная ответственность	101
7.1	Производственная безопасность	101
7.2	Микроклимат	102
7.3	Освещённость рабочей зоны	104
7.4	Уровень шума на рабочем месте	105
7.5	Уровень электромагнитных излучений	106
7.6	Электробезопасность	108
7.7	Экологическая безопасность	109
7.8	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	109
7.9	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	111
7.9.1	Эргономические требования к рабочему месту	111
7.9.2	Окраска и коэффициенты отражения	113
7.9.3	Особенности законодательного регулирования проектных решений	113
	Закключение	115
	Список публикаций	116
	Список использованных источников	117

## **Введение**

Наземная отработка динамики процессов стыковки, раскрытия и сборки крупногабаритных космических конструкций, предназначенных для работы в условиях невесомости, становится всё более ответственным, трудоёмким и дорогостоящим этапом создания и освоения космической техники.

Для ее успешной реализации необходима разработка и создание стендов обезвешивания, позволяющих имитировать процессы развертывания составляющих космического аппарата, в частности солнечных батарей и крупногабаритных антенн в космическом пространстве за счет компенсации всех сил, действующих на объект: силы трения, гравитационные силы, силы инерции. Это возможно лишь при активных вариантах стендов, представляющих собой замкнутые электромеханические системы, имитирующие независимость движения элементов конструкции от гравитационного воздействия Земли.

Сложившаяся практика проектирования и эксплуатации подобных систем предполагает наличие моделирующей системы, позволяющей проводить анализ работы всего стенда, получать его кинематические и динамические характеристики, оценивать точность и качество имитации внешней среды.

В настоящее время компонентное визуальное моделирование является стандартным подходом в автоматизированном моделировании. Оно в гораздо большей степени ориентировано на удобства пользователя, повышает гибкость модели, позволяет опереться на обширные библиотеки моделей компонентов, использовать наглядный способ задания исходной информации и качественную визуализацию результатов моделирования.

Целью диссертационной работы является разработка компонентной модели стенда обезвешивания, позволяющей проводить отработку раскрытия крупногабаритных космических конструкций, в частности крыла батареи солнечной космического аппарата типа «Экспресс-2000» при наземных испытаниях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- проведение литературного обзора по тематике научно-исследовательской работы;
- обработка информации, предоставленной от исполнителей данного проекта, для её дальнейшего внедрения в итоговую модель;
- конвертация 3D-моделей, разработанных в САПР частей стенда обезвешивания в среду моделирования Matlab/Simulink;
- создание модели подвесов, представляющих собой систему продольных и поперечных кареток;
- создание визуализации процесса раскрытия итоговой модели стенда обезвешивания.

Научная новизна основных результатов диссертационной работы состоит в следующем:

- спроектирована модель стенда обезвешивания, представляющая собой системы продольных и поперечных кареток, предназначенная для отработки раскрытия КБС типа «Экспресс-2000»;
- созданы модели объединяющие наработки исполнителей проекта, работавших над созданием отдельных частей модели стенда обезвешивания;
- выполнена визуализация итоговой модели стенда обезвешивания КБС типа «Экспресс-2000».

Полученные результаты планируется использовать для оптимизации алгоритмов управления подвесов, представляющих собой систему следящих продольных и поперечных кареток, а также требований к характеристикам применяемых на стенде измерительных и исполнительных устройств.

Созданная модель стенда позволяет получать необходимую информацию о перемещениях и скоростях движения каждого из элементов КБС, углах раскрытия и угловой скорости каждого ШУ, углах отклонения от вертикали тросов каждой следящей системы кареток, перемещениях и скоростях движения каждой продольной и поперечной каретки.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии», Томск, 9-13 ноября 2015 г.
- IV Всероссийском молодёжном Форуме с международным участием «Инженерия для освоения космоса», Томск, 12-14 апреля 2016 г.
- Вторая Российско-Тихоокеанская Научная Конференция по Компьютерным Технологиям и Приложениям (RPC 2017), Владивосток, 25-29 сентября 2017 (неопубликовано)

Часть содержания диссертационной работы отражено в 3 научных работах и докладах, из них доклад на форуме «Инженерия в освоении космоса» размещен в РИНЦ.

Автор выражает благодарность за научные консультации в создании модели стенда обезвешивания к.т.н. А.В. Воронину, д.т.н. Малышенко А.М. и Шпякину И.К.

## 1 Обзор литературы

Современный испытательный стенд для комплексных проверок функционирования крупногабаритных трансформируемых конструкций космических аппаратов представляет собой сложное техническое устройство, содержащее элементы различной физической природы, работающее под управлением ЭВМ. Сложившаяся практика проектирования и эксплуатации подобных систем предполагает наличие моделирующей системы, позволяющей проводить анализ работы всего стенда, получать его кинематические и динамические характеристики, оценивать точность и качество имитации внешней среды. Особенно велика роль моделирующей системы на этапе создания и отладки стенда, так как она позволяет анализировать качество технических решений, принимаемых разработчиками.

Моделирующая система, в свою очередь, также является достаточно сложным объектом, состоящим из аппаратного, математического, алгоритмического и программного обеспечения. Выбор элементов всех перечисленных видов обеспечения определяется задачами, для решения которых данная система предназначена, и не является тривиальным. При этом ошибки, допущенные на начальном этапе построения системы, имеют самые серьезные последствия.

Обычно столь фундаментальные решения, если они не были изначально оговорены в ТЗ, должны приниматься разработчиком системы моделирования совместно с заказчиком проекта. При этом на начальном этапе может быть просто недостаточно информации для однозначного выбора правильного технического решения. Поэтому, приступая к разработке системы моделирования, есть смысл проанализировать требования заказчика относительно предполагаемых задач и рассмотреть возможные варианты их решения.

Интерес представляют, по крайней мере, следующие вопросы:

- выбор программного обеспечения;

- принципы построения моделирующих программ;
- формат ввода исходной информации о модели и выдачи результатов моделирования.

Прежде всего, следует решить, какой должна быть математическая модель, чтобы она удовлетворяла требованиям технического задания [1]. В техническом задании на ОКР «Кемчуг-2» сформулированы следующие требования к математической модели стенда.

1. Математическая модель (ММ) механического устройства батареи солнечной (МУ БС) определяется габаритно-весовыми характеристиками реального изделия, логикой его раскрытия, параметрами элементов и т.д.
2. Математическая модель активной системы обезвешивания (СОА) должна определить следующие параметры СОА:
  - скорость движения элементов конструкции (элементов СОА) при раскрытии МУ БС;
  - диапазон изменения усилия обезвешивания при раскрытии МУ БС;
  - допустимые габаритно-весовые характеристики элементов СОА, при которых система будет работать устойчиво;
  - точностные характеристики измерительных элементов СОА (датчиков силы (ДС), датчики углов отклонения от вертикали (ДУ)) для обеспечения требуемых параметров системы;
3. ММ должна учитывать факторы, влияющие на раскрытие МУ БС (аэродинамика больших площадей панелей БС при раскрытии, трение в подвижных элементах МУ БС и каретках СОА, жесткость трособлочной вывески, временные задержки в передаче сигналов и т.д.).
4. ММ должна иметь возможность корректироваться и дополняться в процессе разработки, ввода в эксплуатацию и эксплуатации СОА заказчиком.
5. ММ должна обеспечивать наглядную визуализацию процесса раскрытия выбранного изделия в составе СОА.

6. ММ должна быть реализована в среде EULER или Matlab.

Указанные требования можно разделить на 2 части. Пункты 1–3 определяют функциональные возможности моделирующей системы. Пункты 4–6 характеризуют возможности в процессе эксплуатации моделирующей системы, а именно – задания исходной информации и представления результатов, гибкости, удобства внесения изменений в модель, требований к подготовке персонала.

Анализируя ряд литературных источников по данной тематике [3-11], а также требования технического задания и исходных данных [1, 2] можно прийти к некоторым заключениям. Результирующая модель должна давать возможность изучать кинематику и динамику всего стенда, т.е. трансформируемой конструкции и подвеса, отслеживать движения кареток и крыльев БС, обеспечивать их визуализацию. Вероятно, эта модель может не учитывать такие факторы как трение в элементах подвеса, дискретизация сигналов и т.д. Она должна давать возможность исследовать взаимодействие горизонтального и вертикального каналов стенда при отработке различных вариантов разворачивания обезвешиваемых механических конструкций, изучать кинематику процессов раскрытия, отрабатывать логику этих процессов, оценивать точность имитации условий невесомости в процессе разворачивания панелей и т.д. Для данной модели желательна 3D визуализация кинематической схемы всего механизма.

Требования 4–6 тесно связаны с выбором принципов построения моделирующих программ. Испытательный стенд включает элементы различной физической природы – механические и электромеханические компоненты, информационно-измерительные устройства, элементы системы управления стендом. Одна из важнейших задач – выбор способа представления исходной информации об объекте моделирования.

Современные средства автоматизированного моделирования предлагают несколько вариантов такого представления. Важно сделать выбор, который бы



обеспечил решение всех поставленных задач и при этом обеспечил пользователю максимально удобный интерфейс взаимодействия с системой моделирования.

В частности, следует сделать выбор между естественно-научным и различными формами компонентного моделирования.

Естественно-научное моделирование до недавнего времени было единственной формой моделирования систем на ЦВМ. Как правило, оно предполагает получение аналитической модели исследуемого объекта в форме уравнений Коши и численное интегрирование этих уравнений одним или несколькими хорошо известными методами. Несомненным достоинством подобного подхода является то, что таким образом могут быть, в принципе, решены любые задачи моделирования, учтены любые усложняющие модель факторы. Программа может быть реализована на внутреннем языке пакета моделирования высокого уровня, в частности на языке пакета Матлаб с широким использованием стандартных программ этого пакета. Могут использоваться мощные средства выдачи результатов моделирования. Также можно предположить, что программа естественно-научного моделирования при качественном программировании будет работать быстрее, чем программа компонентного моделирования, иметь значительно меньший объем и, при необходимости, может быть сравнительно легко перенесена на другую платформу.

Однако такой подход имеет серьезные недостатки. Полученная модель обладает малой гибкостью и наглядностью. Коррекция модели, переход к другим конструктивным решениям и даже просто замена развертываемой конструкции потребует от пользователя достаточно глубокого понимания законов механики и электротехники, знания основ вычислительных методов и программирования. Серьезные проблемы могут возникнуть с визуализацией исходной информации и получаемых результатов.

Компонентное моделирование в гораздо большей степени ориентировано на удобства пользователя. Оно позволяет опереться на обширные библиотеки моделей компонентов, использовать наглядный способ задания исходной

информации, качественную визуализацию результатов моделирования. Реализуется современное компонентное моделирование в рамках достаточно сложных, объемных и весьма дорогостоящих универсальных или специализированных пакетов, способных решать широкий круг задач.

Техническое задание требует реализации моделирующей системы в среде EULER или MATLAB. Оценим потенциальные возможности данных программных продуктов.

### **Программный комплекс MATLAB**

Пакет для решения задач технических вычислений MATLAB предоставляет пользователю большое количество функций, покрывающих практически все области математики. MATLAB предоставляет удобные средства для разработки алгоритмов, включая высокоуровневые с использованием концепций объектно-ориентированного программирования. В нём имеются все необходимые средства интегрированной среды разработки, включая отладчик и профайлер. Функции для работы с целыми типами данных облегчают создание алгоритмов для микроконтроллеров и других приложений, где это необходимо. В составе пакета MATLAB имеется большое количество функций для построения графиков, в том числе трёхмерных, визуального анализа данных и создания анимированных роликов. Встроенная среда разработки позволяет создавать графические интерфейсы пользователя с различными элементами управления, такими как кнопки, поля ввода и другими. Программы MATLAB, как консольные, так и с графическим интерфейсом пользователя, могут быть собраны с помощью компонента MATLAB Compiler в независимые от MATLAB исполняемые приложения или динамические библиотеки, для запуска на других компьютерах. Пакет MATLAB включает различные интерфейсы для получения доступа к внешним подпрограммам, написанным на других языках программирования, данным, клиентам и серверам, общающимся через технологии Component Object Model или Dynamic Data Exchange, а также периферийным устройствам, которые взаимодействуют напрямую с MATLAB.

Пакет MatLab предлагает в рамках компонентного визуального моделирования как столь универсальное средство как Simulink, так и специализированные пакеты объектно-ориентированного моделирования для исследования механических, электрических и других технических систем, типа SimMechanics, SimPower, StateFlow и др. Специализированные пакеты способны обеспечить моделирование логики механизмов развертывания конструкции, работы алгоритмов управления приводами и т.д.

Применительно к построению моделей стенда проблема лишь в том, можно ли в рамках этих высокоуровневых пакетов обеспечить решение всех поставленных задач. Вероятно, можно достаточно уверенно считать, что это реализуемо, по крайней мере, в рамках Simulink, ввиду его универсальности. В этом смысле, он может рассматриваться как аналог естественно-научного моделирования.

Судя по литературе, именно Simulink является основным инструментом моделирования систем обезвешивания в работах группы Пятибратова Г.Я. [4], в которых решаются задачи анализа и синтеза таких систем для стендов тренировки космонавтов. В процессе построения модели сначала выводятся математические уравнения для механической части стенда, затем они линеаризуются, упрощаются и получают операторно-структурные схемы с включением нелинейных элементов. Эти схемы реализуются в Simulink и используются прежде всего для частотного анализа и синтеза регуляторов. Подход выглядит вполне перспективным, к тому же взаимодействие расширений типа SimMechanics и SimPower, в современных версиях Matlab не является таким затруднительным. В связи с этим в дальнейшем не исключена интеграция дополнительных библиотек, помимо основного расширения Simulink.

Построение в MatLab моделей стенда с широким использованием пакетов SimMechanics и SimPower для моделирования механических и электрических элементов стенда с привлечением возможностей Simulink для моделирования системы управления стендом и трансформируемой конструкцией выглядит наиболее привлекательным. Модель будет иметь максимальную наглядность,

легко корректироваться и дополняться в процессе разработки, ввода в эксплуатацию и эксплуатации СОА заказчиком, обеспечивать наглядную визуализацию процесса раскрытия выбранного изделия. Однако на этом пути могут встретиться проблемы, разрешимость которых, на данный момент, сложно оценить.

Опасения связаны в первую очередь с пакетом SimMechanics, который на данный момент имеет недостаточно широкий спектр моделей компонентов, не позволяющий, на наш взгляд, создавать некоторые кинематические схемы именно в рамках специализированных моделей. Однако, во-первых, библиотеки SimMechanics постоянно расширяются, во-вторых, данное программное средство является открытым и допускает расширение библиотек пользователем.

Таким образом, если ориентироваться только на Matlab\Simulink\SimMechanics\SimPower, прежде всего, следует убедиться, что в рамках принятой концепции не существует принципиальных непреодолимых, или требующих чрезмерных трудозатрат, сложностей и проблемы лишь в осмыслении и грамотной реализации поставленных задач.

### **Программный комплекс EULER**

Программный комплекс EULER может использоваться для моделирования кинематики и динамического поведения самых различных механических систем. Это могут быть как простейшие механизмы, так и сложные системы, в том числе, раскрывающаяся космическая антенна. Моделируемые системы могут включать жесткие и деформируемые элементы конструкции, гидравлические, пневматические и электрические системы, системы управления и другие компоненты. Программный комплекс предназначен для анализа работы механических систем, включающих в себя сложную кинематику, большие движения, жесткие и деформируемые элементы конструкции, гидравлические, пневматические и электрические системы, системы управления и другие компоненты.

В программном комплексе EULER реализована оригинальная технология автоматизированного динамического анализа многокомпонентных

механических систем. Программный комплекс EULER может применяться при проектировании, отработке, испытаниях и доводке различных изделий, в научных и прикладных исследованиях. С помощью математических моделей можно определять характеристики работы новых систем, оптимизировать их параметры и проводить сравнительный анализ различных вариантов конструкции. Комплекс EULER также позволяет оперативно проводить исследования нештатных ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации существующих систем. В результате, сокращаются сроки разработки, существенно уменьшается объем доводочных испытаний, повышается качество изделий и снижаются затраты на их создание.

Основные возможности программного комплекса:

- Собственный редактор создания геометрических и массово-инерционных объектов (point, node, vector, line, plane, surface, solid, MIP). Для тел может задаваться плотность или масса, равномерно распределяемая по объему тела.
- Моделирование кинематики/динамики системы твердых и упругих тел в рамках единой технологии (body).
- Кинематические связи между телами (joint).
- Силовые взаимодействия тел и воздействия внешней среды (force).
- Измерение различных параметров механической системы (sensor)
- Программные движения механической системы (motion).
- Изменения механической системы в процессе ее функционирования (reform, event).
- Функции задания формы геометрических объектов и характеристик силовых взаимодействий (function).
- Списки (массивы) объектов для описания больших систем (list).
- Агрегаты (подсистемы) с параметризацией объектов различных типов (assembly).

- Произвольное задание размерностей физических величин на входе и выходе.
- Полная параметризация задания объектов механической системы. В процессе работы запоминаются и отслеживаются все отношения и зависимости, возникающие при формировании объектов механической системы.
- Синхронизация диалогового описания механической системы с ее документированием в текстовом файле. Возможность редактирования текстового файла проекта.
- Спектральный анализ результатов моделирования.
- Импорт геометрических моделей из CAD-систем.
- Использование моделей MATLAB/Simulink.

В результате проведения расчета в EULER могут быть получены следующие характеристики:

- Кинематические параметры движения любых характерных точек исследуемой механической системы (линейные/угловые координаты, скорости, ускорения).
- Силы, действующие на части механической системы со стороны кинематических связей (шарниров) и силовых элементов (пружин, амортизаторов, внешней среды и т.д.).
- Необходимые управляющие воздействия при движении исследуемой системы по заданной программе.

Состав и краткое описание модулей программного комплекса представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав модулей программного комплекса EULER

Euler/Base	Базовый модуль. Включает решатель, препроцессор, постпроцессор и основные компоненты создания моделей механизмов. Без этого модуля невозможна работа других модулей ПК.
------------	---

Продолжение таблицы 1

Euler/Advanced	Модуль расширяет возможности по моделированию механизмов. Позволяет задавать переменные массово-инерционные характеристики, создавать списки объектов, использовать контактные силовые элементы, задавать программное движение с дифференциальным каналом и др.
Euler/Aero	Модуль расчета аэро-гидродинамических сил.
Euler/Tire	Модуль расчета шин.
Euler/Vibration	Модуль оценки вибрационной нагруженности механизмов.
Euler/CAD interface	Модуль импорта из CAD-программ в формате STEP, IGES и ECT.
Euler/Research	Модуль исследовательских расчетов. Позволяет проводить оптимизацию, параметрический и статистический анализ, решать краевые задачи и проводить другие исследования.
Euler/Simulink	Модуль обеспечивает подключение моделей MathLab Simulink.
Euler/Flex	Модуль позволяет создавать механизмы с деформируемыми звеньями, исходные данные для которых должны быть подготовлены в ПК MSC.NASTRAN.

Стоимость вариантов лицензий академической версии программы приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Стоимость лицензии EULER

Версия	Стоимость, руб.	Примечание
EULER Uni	48 000	5 рабочих мест
EULER Student	0 при выполнении определенных условий. Подробности по запросу.	1 рабочее место
EULER Personal	12 000	1 рабочее место

Вместе с тем, на данном этапе ОКР возможности такого комплекса представляются избыточными. Его реализация может серьезно рассматриваться лишь в перспективе создания автоматизированного рабочего места имитационного моделирования испытаний крыльев солнечных батарей (АРМ

ИМИКБС) у Генерального заказчика ОКР «Кемчуг» – АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева». Это АРМ ИМИКБС могла бы использоваться не только для имитационного моделирования процессов испытаний механических устройств КБС, но и для моделирования процессов раскрытия других типов трансформируемых механических конструкций на данном предприятии, а также для последующего реинжиниринга создаваемого стенда для наземных испытаний МУ КБС или разработки других вариантов подобных стендов.

По информации, полученной из Центра Компетенций MathWork в Российской Федерации ([www.sl-mathlab.ru](http://www.sl-mathlab.ru)), ориентировочная стоимость стандартного пакета MATLAB СОСТАВЛЯЕТ порядка 39000 USD. Стоимость программного пакета SolidWorks по последним данным составляет 640 тыс. руб. в профессиональной версии, являющейся наиболее предпочтительной для работы. По предварительным данным стоимость пакета MSC.ADAMS составляет порядка 1 200 тыс. руб. Таким образом, общая стоимость указанных программных средств может составить порядка 3800 тысяч рублей.

Учитывая указанную неопределенность на данном этапе ОКР с выбором основного инструмента для построения моделей стенда, было принято решение на начальном этапе моделирования разработать два варианта модели стенда первого приближения – естественно-научную и компонентную на базе MatLab\ Simulink\ SimMechanics\ SimPower. Это позволит оценить предполагаемые трудозатраты при создании конечного продукта, оценить применимость той или иной модели к решению задач, поставленных в ТЗ, проанализировать и сравнить требования к аппаратному обеспечению, затратам оперативной памяти, сравнить время счета различных моделей и, что весьма важно, получить инструмент верификации моделей.



## 2 Объект и методы исследования

Создание современных крупногабаритных трансформируемых конструкций космических аппаратов, таких как солнечные батареи и антенны радиоэлектронной аппаратуры, предполагает наземную отработку их функционирования на специальных испытательных стендах, обеспечивающих высокоточную имитацию условий невесомости. Стенд должен обеспечить имитацию процесса разворачивания конструкции в наземных условиях с минимально возможным уровнем взаимодействия испытуемой конструкции с самим стендом, т.е. с минимальными энергетическими потерями. Наиболее перспективными в этом отношении являются стенды с системами обезвешивания активными (СОА) на основе следящих электроприводов кареток вывески и систем автоматической стабилизации сил обезвешивания в тросах подвеса.

На рисунок 1 схематично представлен общий вид стенда для наземных испытаний механических устройств разворачивания крыльев солнечных батарей (КБС) космических аппаратов. Из рисунка видно, что механически, стенд представляет из себя систему кареток для тросовых подвесов, передвигающихся в горизонтальных плоскостях, и отслеживающих перемещения панелей, рам и штанг КБС в процессе раскрытия.

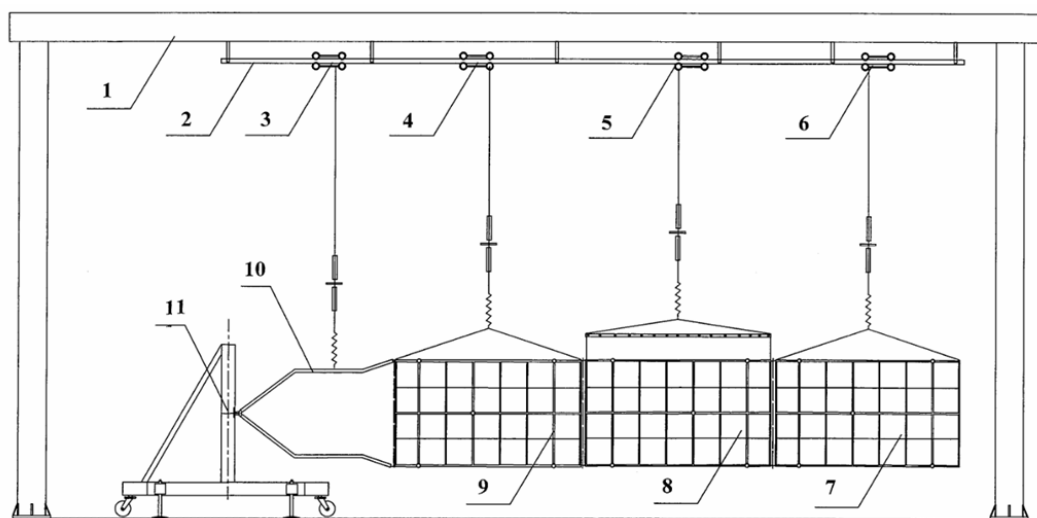


Рисунок 1 – Схема обезвешивания крыла батареи солнечной типа «Экспресс-2000» в рабочем положении

На рисунке 1 цифрами обозначено следующее:

1 – силовая колонна; 2 – двойные направляющие; 3 – каретка с вывеской обезвешивания штанги; 4 – каретка с вывеской обезвешивания корневой панели; 5 – каретка с вывеской обезвешивания промежуточного пакета; 6 – каретка с вывеской обезвешивания концевой панели; 7 – концевая панель; 8 – промежуточная панель; 9 – корневая панель; 10 – рама; 11 – рама имитатора корпуса спутника.

Стенд включает в себя следующие основные устройства:

- каретки продольно-поперечных перемещений и обезвешивания, которые являются основными электромеханическими узлами СОА и используются для компенсации веса обезвешиваемых элементов КБС при их продольных и поперечных перемещениях в процессе раскрытия;
- профильные рельсовые двойные направляющие для продольного перемещения кареток в процессе раскрытия КБС;
- датчики продольного положения кареток;
- двухкоординатные датчики отклонения тросов подвеса относительно вертикали;
- датчики сил натяжения тросов обезвешивания.

Активная система обезвешивания КБС представляет собой программно-аппаратный комплекс, работающий в процессе раскрытия КБС в автоматическом режиме. Обезвешивание каждого из раскрываемых элементов КБС обеспечивается двумя следящими системами, обеспечивающими вертикальность положения этого троса в процессе раскрытия КБС, и системой автоматической стабилизации натяжения троса (САС НТ), обеспечивающей минимум между весом обезвешиваемого элемента КБС и силой натяжения троса, на котором он подвешен на каретке.

Кроме того, стенд содержит программно-аппаратную часть, обеспечивающую настройку стенда на условия конкретного эксперимента,

управление экспериментом, обработку и визуализацию результатов экспериментов.

Таким образом, современный испытательный стенд для комплексных проверок функционирования конструкций космических аппаратов представляет собой сложное техническое устройство, содержащее элементы различной физической природы, работающее под управлением ЭВМ. Сложившаяся практика проектирования и эксплуатации подобных систем предполагает наличие моделирующей системы, позволяющей проводить анализ совместной работы стенда и испытуемого КБС, получать их кинематические и динамические характеристики, оценивать точность и качество имитации невесомости.

Моделирующая система, в свою очередь, также является достаточно сложным объектом, состоящим из аппаратного, математического, алгоритмического и программного обеспечения. Выбор элементов всех перечисленных видов обеспечения определяется задачами, для решения которых данная система предназначена, и не является тривиальным. При этом ошибки, допущенные на начальном этапе построения системы, имеют самые серьезные последствия. Интерес представляют, по крайней мере, такие вопросы как выбор программного обеспечения, принципы построения моделирующих программ, формат ввода исходной информации о модели и выдачи результатов моделирования.

Основные требования к математической модели стенда, сформулированные в техническом задании, включают отражение таких параметров СОА как скорости движения элементов конструкции, диапазоны изменения усилия обезвешивания, точностные характеристики работы следящих систем и САС НТ стенда. При этом модель должна учитывать аэродинамику больших площадей панелей БС при раскрытии, трение в подвижных элементах механических устройств КБС и каретках СОА, жесткость трособлочной вывески, временные задержки в передаче сигналов и ряд других факторов. Математическая модель (ММ) должна иметь возможность корректироваться и дополняться в процессе разработки, ввода в эксплуатацию и эксплуатации СОА.

Она должна обеспечивать наглядную визуализацию процесса раскрытия выбранного изделия в составе СОА и быть реализована с использованием достаточно общедоступных программных средств.

В результате анализа требований к ММ с точки зрения способа представления исходной информации об объекте выбор был сделан в пользу компонентного моделирования, которое обеспечивает пользователю максимально удобный интерфейс взаимодействия с системой моделирования. Данный подход, в отличие от описания механической части моделируемой системы уравнениями Лагранжа [12, 13], позволяет опереться на обширные библиотеки моделей компонентов различной физической природы, в том числе разработанные при проектировании станда в CAD системах, использовать наглядный способ задания исходной информации, качественную визуализацию результатов моделирования. Анализ программных средств показал, что наиболее подходящими средствами компонентного моделирования, с точки зрения моделирования механики, являются такие пакеты автоматизированного моделирования, как EULER и Matlab\Simulink\SimScape Multibody.

Учитывая, что модель станда должна включать модели электрических, информационных и управляющих компонентов станда, было принято решение создавать модель в среде Matlab\Simulink\SimScape Multibody, с привлечением возможностей SolidWorks, Autodesk Inventor и ряда других CAD для создания моделей механических компонентов. В частности, была использована вторая генерация моделей SimMechanics, обеспечивающая более качественную визуализацию процессов трансформации механических систем.

Моделирование процессов раскрытия КБС на станде, имитирующем условия невесомости, при таком подходе сводится к моделированию в отдельности испытуемого крыла батареи солнечной и станда для его испытаний. Связующими их элементами в таком случае выступают тросовые подвесы отдельных частей КБС на каретках станда.

### 3 Проектирование компонентной модели крыла батареи солнечной «Экспресс-2000» в среде Matlab/Simulink/SimMechanics 2 Gen

В данном разделе изложены результаты применения возможностей среды к построению модели крыла БС батареи солнечной (БС) «Экспресс-2000». Общий вид и размеры крыла представлены на рисунке 2.

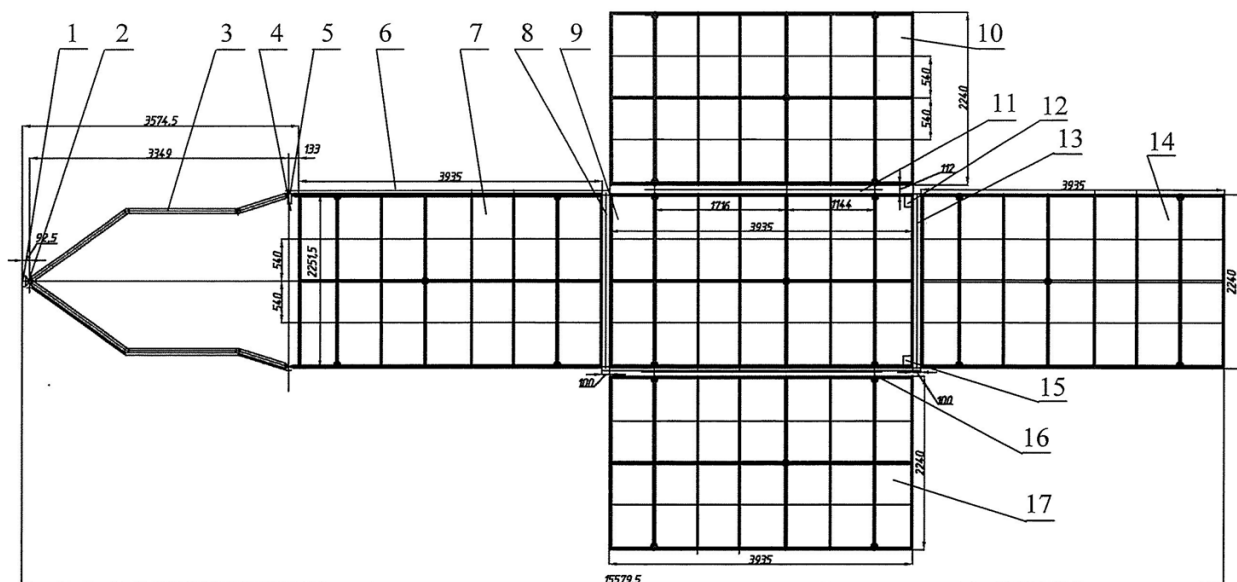


Рисунок 2 – Общий вид и основные габаритные параметры крыла БС «Экспресс-2000» в рабочем положении

На рисунке 2 обозначены следующие элементы: 1 – корневой фланец штанги БС; 2 – корневой шарнирного устройства (ШУ) штанги БС (ШУ1); 3 – рама штанги БС; 4 – электромеханический привод; 5 – концевой ШУ штанги БС (ШУ2); 6 – система синхронизации; 7 – корневая панель; 8 – ШУ промежуточной панели (ШУ3); 9 – промежуточная панель; 10, 17 – боковые панели; 11, 16 – ШУ боковых панелей (ШУ5, ШУ6); 12, 15 – узлы задержки раскрытия боковых панелей БС; 13 – ШУ концевой панели (ШУ4); 14 – концевая панель.

В данном случае модель БС рассматривается как часть общей имитационной модели стенда и ее кинематическая схема строится на основе компонентов расширения MatLab\ Simulink\ SimMechanics.

### 3.1 Проектирование моделей основных элементов кинематических схем крыльев солнечных батарей

Как динамика, так и кинематика конструкции могут быть изучены по довольно упрощенным моделям, которые учитывают только важнейшие особенности механической части объекта моделирования. Например, нет необходимости отображать ШУ вплоть до каждой мелочи, достаточно лишь показать его наличие.


Сформируем основные принципы построения модели в SimMechanics второго поколения.

- Для того чтобы отобразить физическое тело, необходимо определить систему координат центра фигуры при помощи блока Жесткой системы координат (Rigid Transform) (СК). Далее прикрепить к этой СК блок Тела (Solid) и задать в нём массогабаритные характеристики (Рисунок 9). Из элементарных фигур можно создавать сложные, приняв одну из СК объекта, как родительскую, закрепляя на ней дочерние (Пример на рисунке 14).
- В данной библиотеке исходной точкой является мировая СК (World), координаты которой (0,0,0), как и направление мировой СК жёстко заданы. Имеется возможность закрепить за мировой блок Жёсткой СК и принять его за основной. В этом случае можно изменить направление осей исходной СК, задав необходимые параметры в поле Rotation.
- В качестве начального состояния крыла БС примем «свернутое» состояние панелей БС.
- Каждое тело, которое необходимо включить в модель, будет описываться в его исходном состоянии, т.е. так, как оно выглядит в начальный момент времени.
- Альтернативным вариантом может быть описание панелей БС в «развернутом» конечном положении. Данный вариант несколько проще и нагляднее в описании, но проигрывает с точки зрения визуализации.

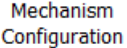
- При раскрытии крыла БС на данном этапе будем рассматривать только горизонтальный канал, при этом учитывая массы и габариты боковых панелей.

Опишем блоки необходимые для создания модели крыла БС.



1) World Frame  (Мировая система координат). Данный блок отображает мировую СК, относительно которой определяются другие системы. В параметрах блока нет возможности задать исходную точку. Модель может иметь несколько блоков World Frame, но все они будут относиться к одной и той же точке в пространстве.



2) Mechanism Configuration  (Параметры механизма). Данный блок описывает окружающие силы, которые воздействуют на модель. В нашем случае, этот блок необходим, прежде всего, для описания силы гравитации (Рисунок 3). Есть возможность задать дельту линеаризации (Linearization Delta), которая определяет значение возмущений, используемое для вычисления числовых частных производных для линеаризации.

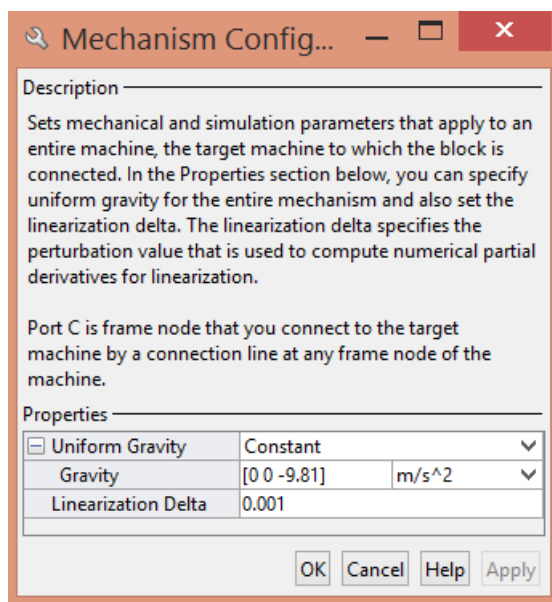
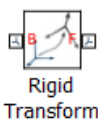


Рисунок 3 – Свойства блока «Параметры механизма»



3) Rigid Transform (Жёсткая система координат). Данный блок является заимствованием основополагающего элемента языка WRLM – Transform, который используется в библиотеке 3D Animation (VR Builder). Блок представляет собой дополнительную СК, расположение (Translation) и ориентацию (Rotation) осей которой можно задать в свойствах блока (Рисунок 4).

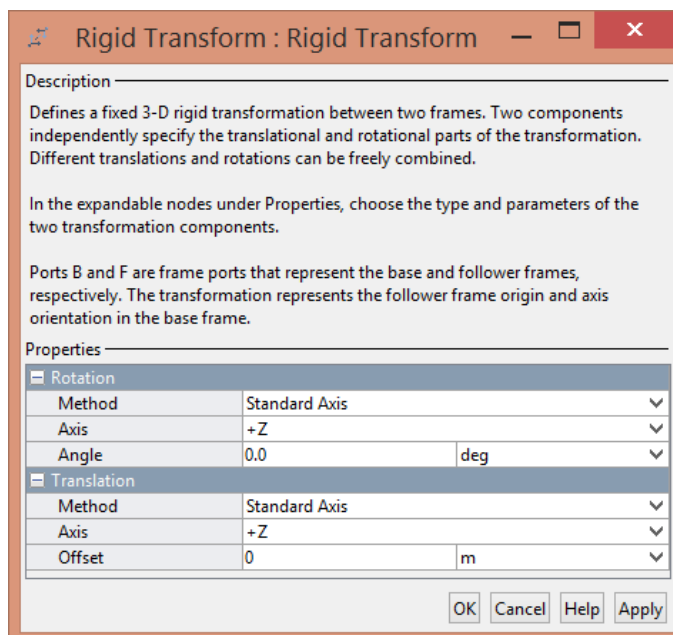


Рисунок 4 – Свойства блока «Жёсткая система координат»

Приведём пример функционирования блока Жёсткой СК. Для этого поставим в пустую модель 2 блока Жёсткой СК (Рисунок 5). В свойствах первой не будем ничего менять (СК будет совпадать с мировой СК) (Рисунок 6), а во второй повернём СК вокруг положительной оси X на 90 градусов и перенесём в пространстве на 1 м. по оси Y (Рисунок 7). В результате при запуске модели получим следующий результат (Рисунок 8).

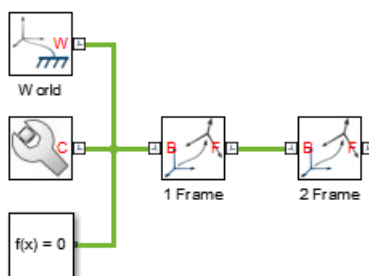


Рисунок 5 – Пример функционирования блока Жёсткой СК



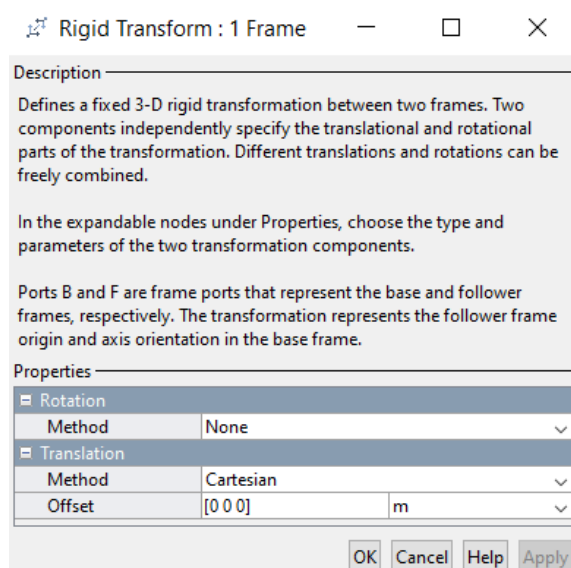


Рисунок 6 – Свойства первой СК

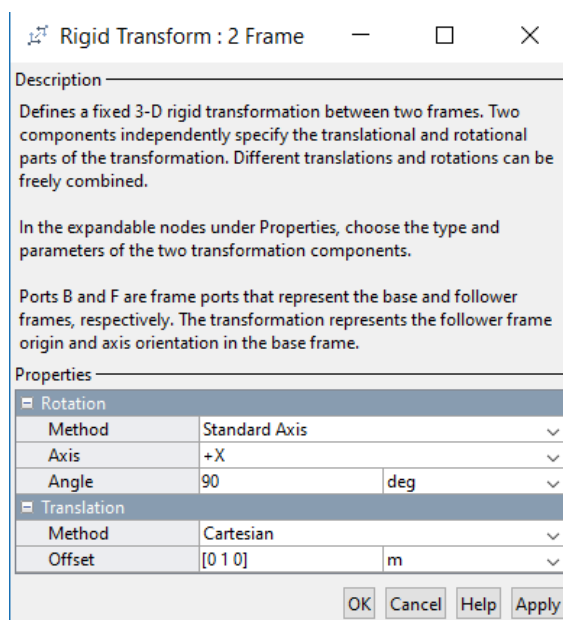


Рисунок 7 – Свойства второй СК



Рисунок 8 – Визуализация примера функционирования блока Жёсткой СК

Из рисунка 8 видно, что оси первой СК полностью повторяют направления осей мировой СК. Вторая же СК переместилась на 1 метр в пространстве, по направлению оси Y первой системы координат, а также повернулась на 90 градусов против часовой стрелки по положительной оси X.



4) Solid (Твёрдое тело). Данный блок является физической моделью твердого тела (Рисунок 9). Центром масс блока является центр Жёсткой СК, за которой он закреплён (Рисунок 10). Форма блока определяется набором элементарных геометрических фигур в его свойствах. Длина, ширина и глубина (в случае параллелепипеда) направлены по осям СК, к которой прикреплён блок. Тензор инерции и масса объединены. Есть возможность задать автоматический расчёт тензора инерции от значения массы блока или плотности материала.

5) Группа блоков Joints (Сочленения) (Рисунок 11). Во втором поколении отказались от таких блоков как Joint Sensor (Датчик сочленения), Joint Spring & Damper (Пружинно-демпферное сочленение). Данные типы блоков объединили внесли в блок Сочленения, как это видно на примере Prismatic (Рисунок 12).

Стоит отметить один недостаток сочленения в библиотеке второго поколения. Выбирать ось, для которой будет доступна степень свободы, теперь нельзя. Так для сочленений с одной степенью свободы движение будет осуществляться вокруг (Revolute) или вдоль (Prismatic) оси Z. Для двух осевой степени свободы (Rectangular) применяются оси Y и X. Данная проблема решается путём добавления дополнительной Жёсткой СК, специально под Сочленение, в которой ей задаётся необходимая ориентация или позиция в пространстве.

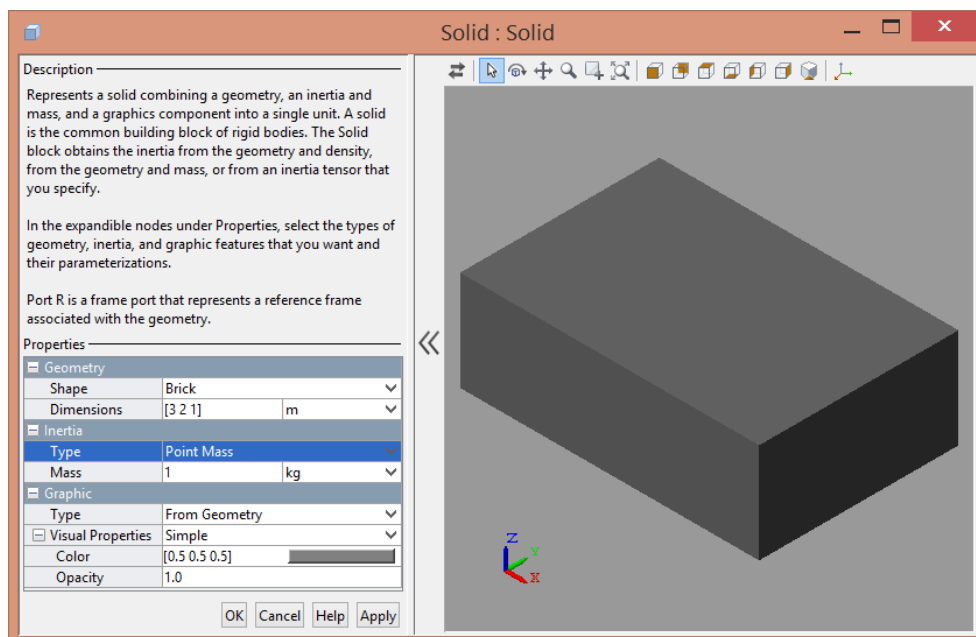


Рисунок 9 – Свойства блока Жёсткое тело

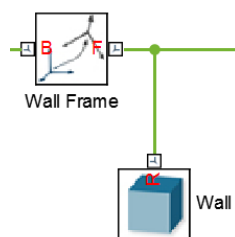


Рисунок 10 – Пример прикреплённого блока Жёсткое тело к Жёсткой СК

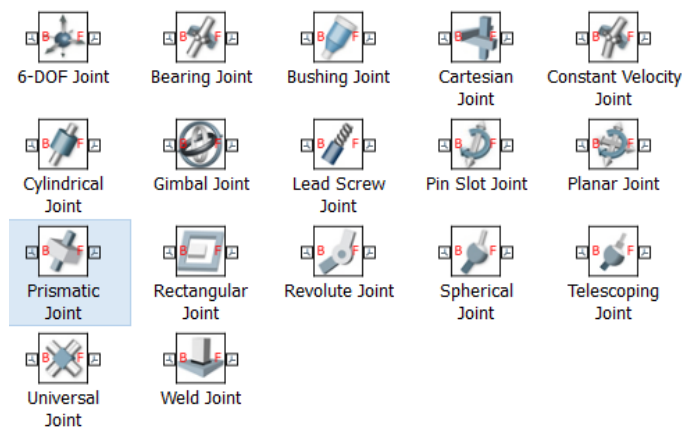


Рисунок 11 – Группа блоков Сочленения

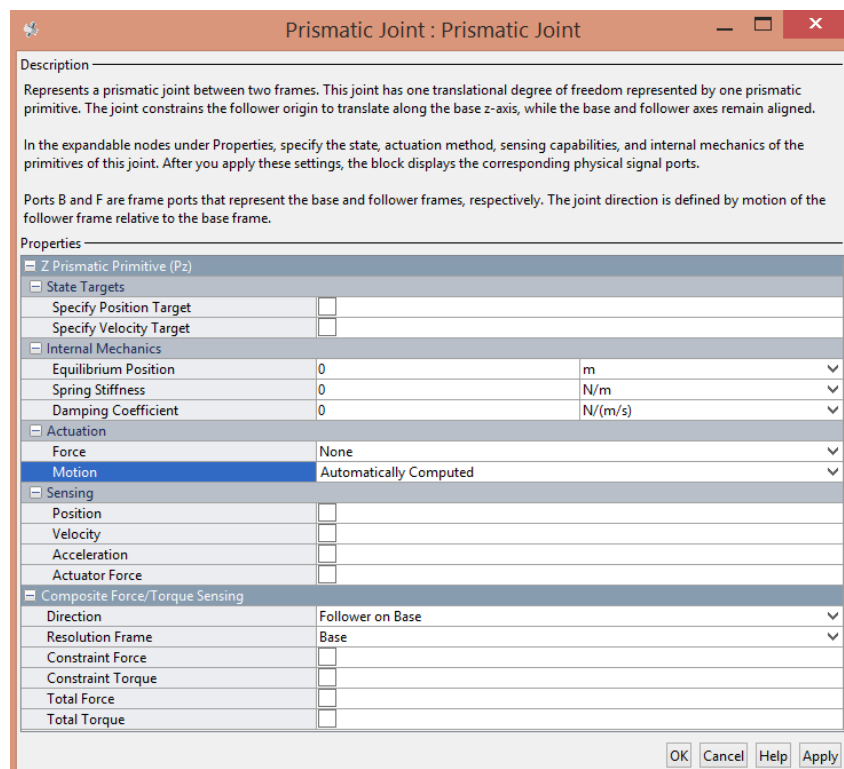


Рисунок 12 – Свойства сочленения типа Prismatic

Степени свободы, теперь, задаются относительно Жёстких СК (Рисунок 13), а не как в первом поколении между блоками Тел.

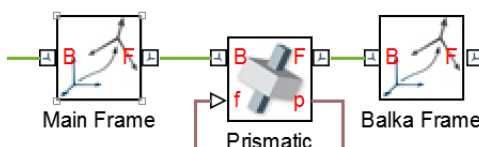


Рисунок 13 – Пример подключения блока сочленения Prismatic

Далее будут приводиться этапы создания отдельных элементов КБС. Для удобства навигации по модели каждый элемент объединен в собственную подсистему.

### 3.2 Модель штанги

Разобьём модель Штанги на шесть частей по числу объектов, выделенных изгибами. В результате получим модель, представленную на рисунках 14 и 15. Примем, что профиль штанги представляет собой стержень диаметром 100 мм.

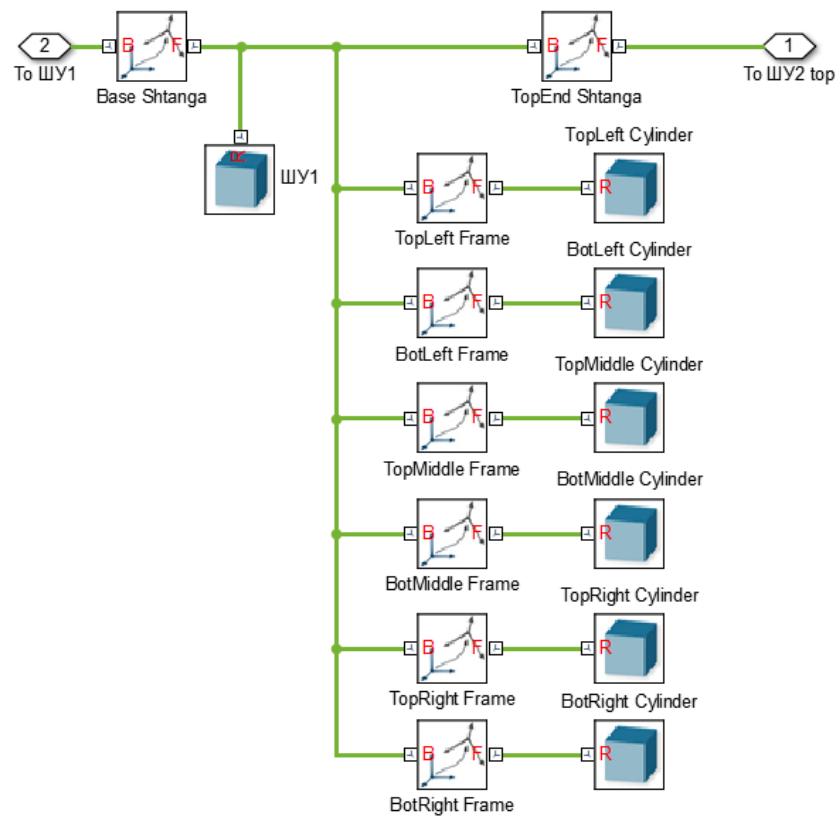


Рисунок 14 – Модель штанги в Simulink

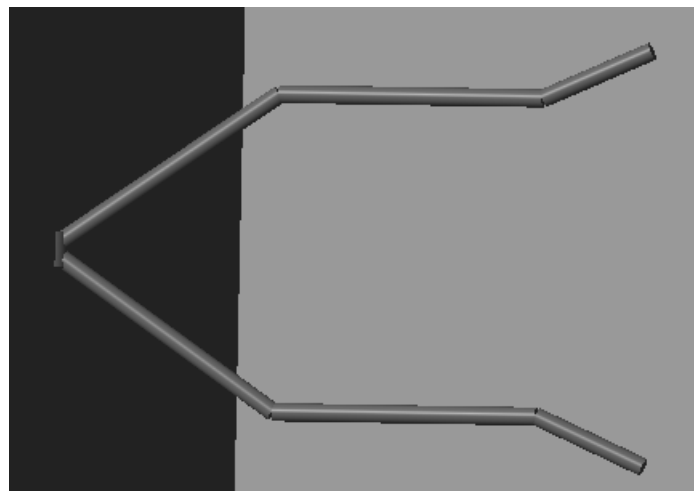


Рисунок 15 – Визуализированная модель штанги

Поясним, что отображает каждый из блоков данной модели.

Два блока Жёстких СК Base Shtanga и TopEnd Shtanga являются точками сочленений с соседними компонентами КБС. Так, Base Shtanga является родительской СК для всей модели штанги, перемещение которой задаётся сочленением ШУ1 (Рисунок 16). TopEnd Shtanga является основанием,

относительно которого будет двигаться следующий элемент крыла БС при помощи сочленения ШУ2 Top Rev.

Далее идут блоки физических моделей. Жёсткие СК (TopLeft Frame, BotLeft Frame, TopMiddle Frame, BotMiddle Frame, TopRight Frame, BotRight Frame) являются центрами масс для отдельных частей штанги. А блоки Тел, прикреплённые к соответствующим СК представляют физические модели.



Рисунок 16 – Вырезка из общей модели подсистемы штанги с блоками сочленений

Блок Тела ШУ1 отображает шарнирное устройство между стеной и штангой.

Подобная структура (Рисунок 14) будет использоваться и в последующих моделях компонентов КБС.

### 3.3 Корневая панель

На данном этапе моделирования, панели КБС будем представлять в виде параллелепипедов, соблюдая габариты в соответствии с рисунком 2.

На рисунке 17 представлено устройство подсистемы корневой панели, на рисунке 18 визуализация корневой панели в составе КБС, а на рисунке 19 свойства блока Тела корневой панели.

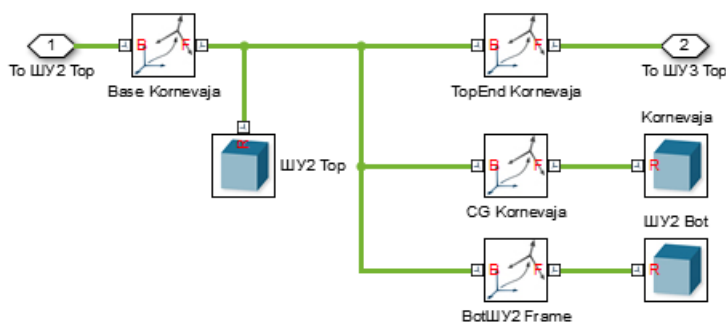


Рисунок 17 – Модель корневой панели в Simulink



Рисунок 18 – Визуализированная корневая панель в составе КБС

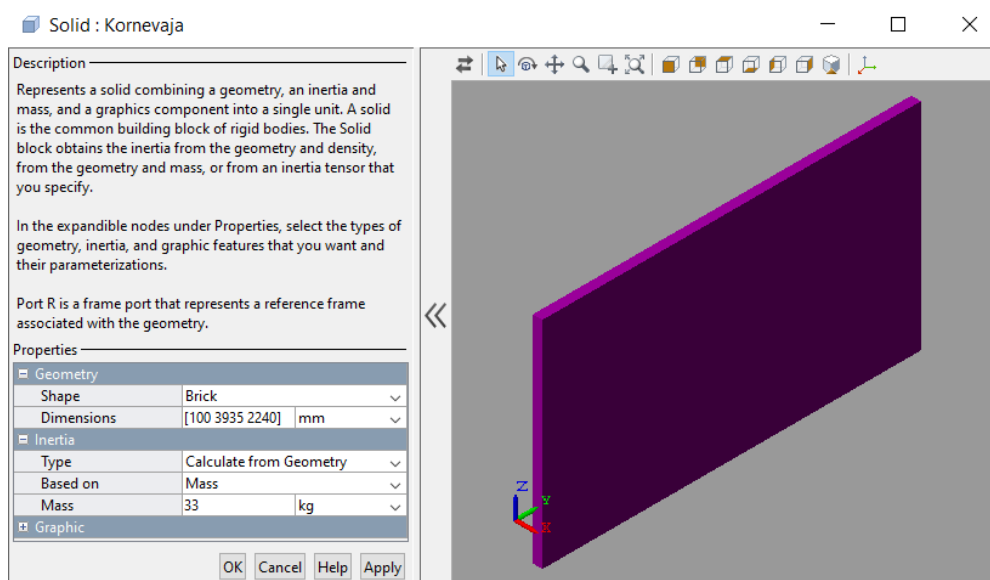


Рисунок 19 – Свойства блока Тела корневой панели

Поясним используемые блоки.

Жёсткая СК Base Kornevaja является родительской СК для всей модели корневой панели. TopEnd Kornevaja является основанием, относительно которого будет двигаться следующий элемент КБС при помощи сочленения ШУЗ Top Rev1.

CG Kornevaja и BotШУ2 Frame являются центрами масс для блоков тел корневой панели (Kornevaja) и нижнего шарнирного устройства (ШУ2 Bot).

Стоит отметить, что в характеристики тела корневой панели внесены массогабаритные характеристики в соответствии с техническим заданием (Масса = 33 кг, габариты взяты в соответствии с рисунком 1, толщина принята 100 мм).

### 3.4 Третье шарнирное устройство

После корневой панели идёт пакет из трёх панелей (промежуточная и закреплённые на ней нижняя и верхняя боковые панели). Прежде чем перейти к их созданию необходимо решить проблему нестандартного ШУ, которое будет соединять корневую и промежуточную панель с учётом промежутка в виде верхней боковой панели (Рисунок 20).



Рисунок 20 – Схема модели ШУЗ

На рисунке 21 показан состав модели ШУЗ, рисунок 22 – свойства блока Тела ШУЗ. Он включает в себя СК центра масс физической модели ШУ (BaseFrame ШУЗ), блок тела ШУЗ Top и СК RevMiddlePanel Frame являющееся основанием, относительно которого будет двигаться следующий элемент КБС при помощи сочленения ШУЗ Top Rev2.

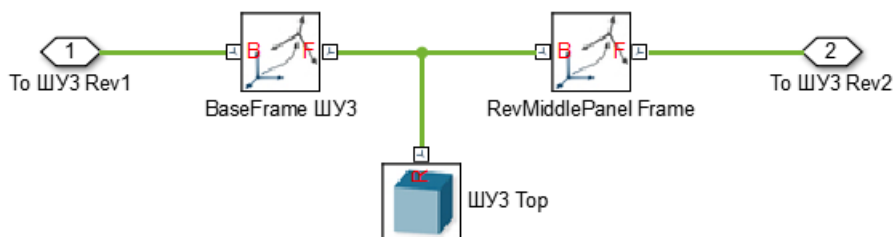


Рисунок 21 – Модель ШУЗ



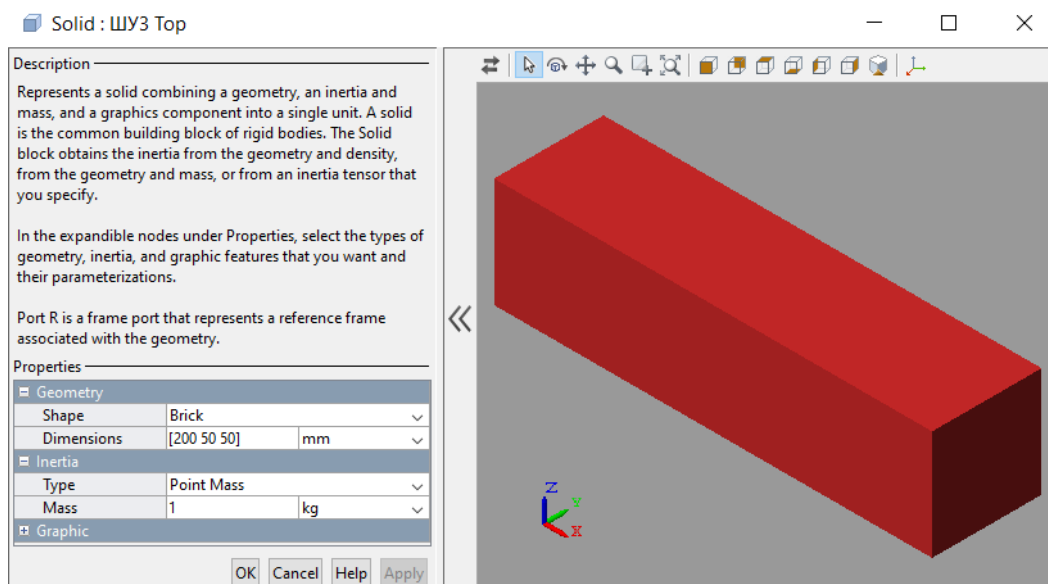


Рисунок 22 – Свойства блока Тела ШУ3 в составе КБС

### 3.5 Промежуточная и боковые панели

Стоит оговориться, что на данном этапе разработки модели крыла СБ было решено моделировать только горизонтальный канал раскрытия крыла, то есть верхняя и нижняя боковые панели будут оставаться зачекованными на протяжении всего процесса раскрытия. В связи с этим в модели промежуточной панели, помимо блоков, представленных при создании корневой панели, появятся ещё сочленения к боковым панелям (ШУ5 и ШУ6), а также выходы под ограничения (Angle Constraint – угловое ограничение), которые будут сохранять боковые панели зачекованными (Рисунок 23).

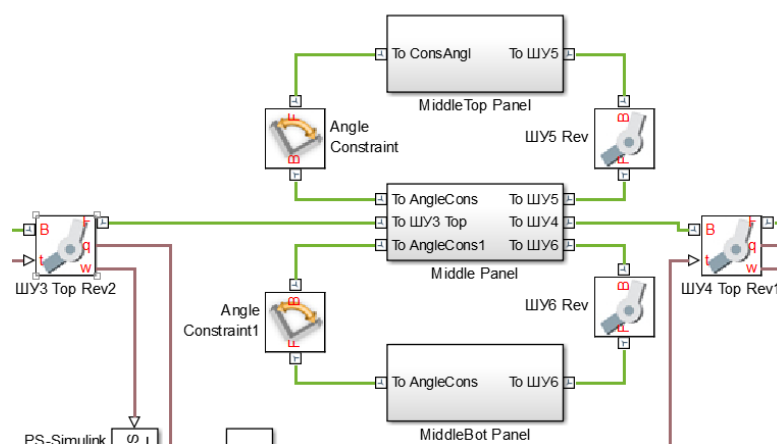


Рисунок 23 – Вырезка из общей модели крыла СБ с приведёнными подсистемами промежуточной и боковых панелей

Рассмотрим подсистему промежуточной панели (Рисунок 24). Родительская СК представлена блоком Base MiddlePanel, так же стоит отметить СК центра координат панели CG MiddlePanel и блок тела MiddlePanel.

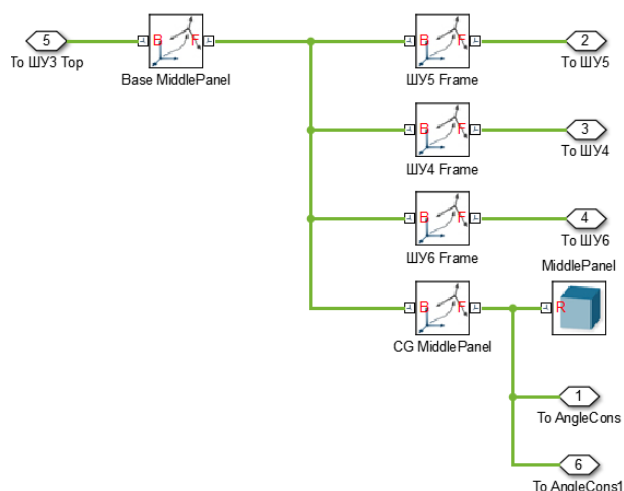


Рисунок 24 – Модель промежуточной панели

Блоки СК ШУ5 Frame и ШУ6 Frame являются основаниями, относительно которых будут двигаться боковые крылья СБ при помощи сочленений ШУ5 Rev и ШУ6 Rev, соответственно. ШУ4 Frame – основание для концевой панели к сочленению ШУ4 Top Rev1.

Стоит оговориться о выходах 1 и 6 из подсистемы обозначенные как To AngleCons и To AngleCons1. Данные выходы ведут к блокам ограничения по углу Angle Constraint и Angle Constraint1 показанные на рисунке 23. Эти блоки ограничивают две СК по осям Z. В нашем случае СК панелей выставлены так, чтобы они являлись сонаправленными, а блок ограничений выставлен так, чтобы оси оставались параллельными (Рисунок 25).

Рассмотрим подсистему верхней боковой панели (Рисунок 26). Родительская СК представлена блоком Base MiddleTop, жёсткая СК центра масс верхней боковой панели – CG MiddleTop, СК Second ШУ5 Frame – центр физической модели второго шарнирного устройства.

MiddleTop – блок тела верхней боковой панели. ШУ5 – блок тела пятого шарнирного устройства.

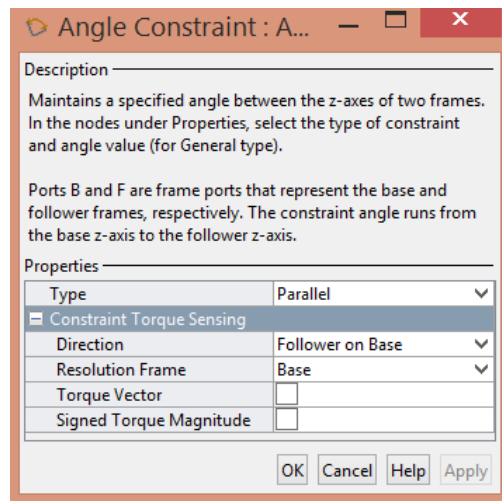


Рисунок 25 – Свойства блока Angle Constraint

Модель нижней боковой панели отличается только названием блоков, в остальном блоки выполняют те же функции (Рисунок 27).

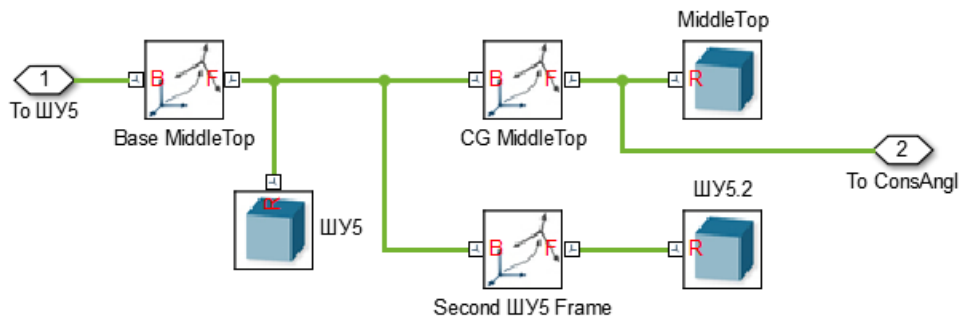


Рисунок 26 – Модель верхней боковой панели

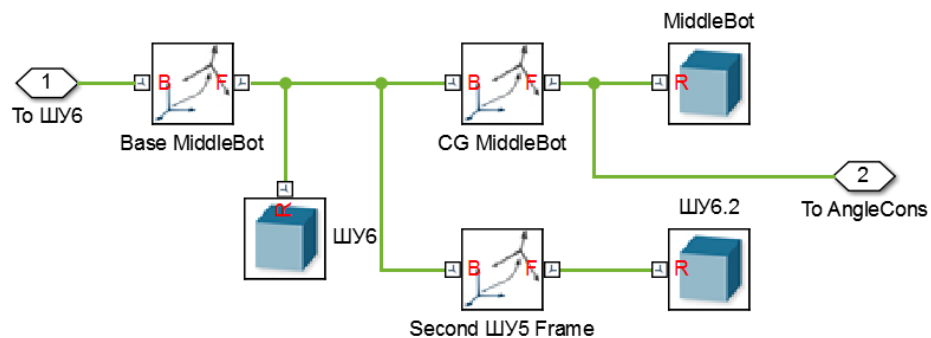


Рисунок 27 – Модель нижней боковой панели

### 3.6 Четвёртое шарнирное устройство

Модель четвёртого шарнирного устройства представлена на рисунке 28. Данная модель отличается от описания ШУЗ только названиями блоков, в остальном блоки выполняют те же функции.

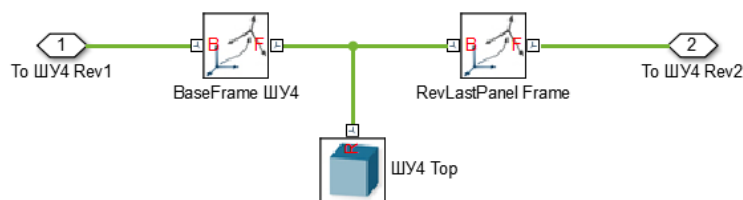


Рисунок 28 – Модель четвёртого ШУ

### 3.7 Концевая панель

Модель концевой панели представлена на рисунке 29. Жёсткая СК Base MiddlePanel является родительской СК для всей модели концевой панели. CG LastPanel является СК отображающей центр масс физической модели тела LastPanel



Рисунок 29 – Модель концевой панели крыла СБ

### 3.8 Итоговая модель

Итоговая модель в варианте без системы управления и с системой управления расположены в приложении А. Визуализированный вариант КБС в транспортировочном и рабочем состоянии показаны на рисунках 30 и 31.

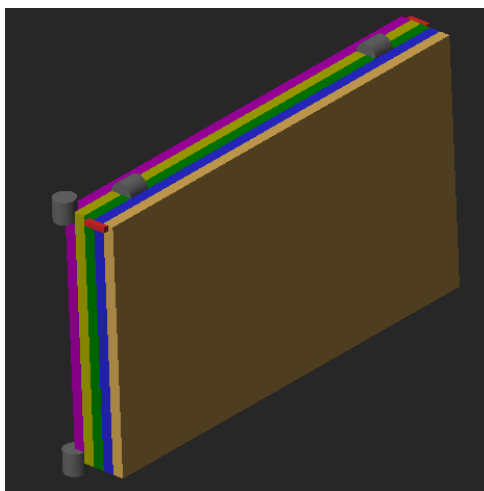


Рисунок 30 – Визуализированная модель КБС в транспортировочном состоянии

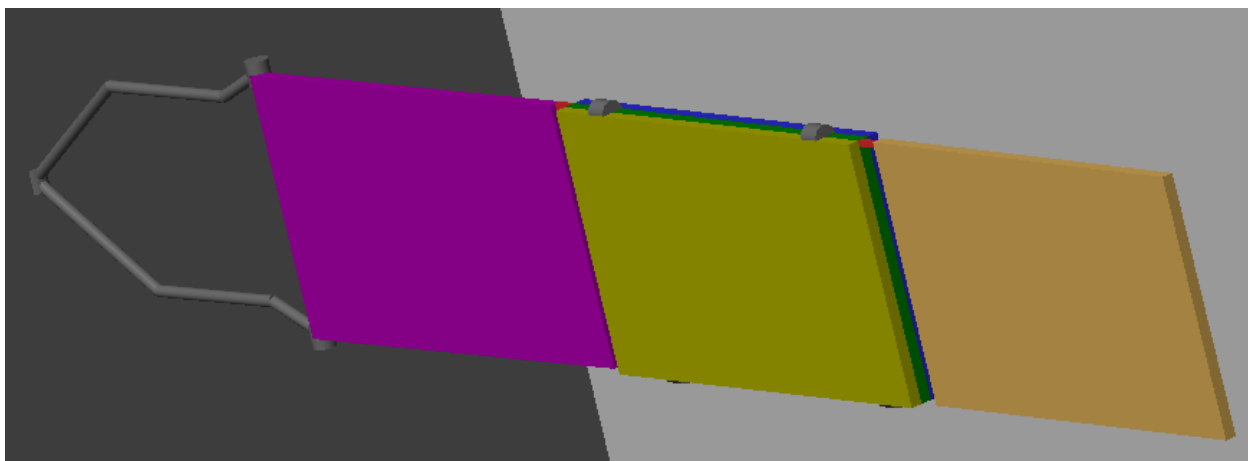


Рисунок 31 – Визуализированная модель КБС в рабочем состоянии при нераскрытых боковых панелях вертикального канала

## **4 Проектирование системы продольной и поперечной кареток в составе подвеса стенда обезвешивания**

### **4.1 Подготовка и упрощение модели продольной каретки**

В ходе сотрудничества по данному проекту от конструкторско-технологического института научного приборостроения (КТИ НП) была предоставлена модель продольной каретки (Рисунок 32), созданная в среде Autodesk Inventor. Целью данного шага является перенос полученной модели в пакет прикладных программ Matlab, в частности в его приложение Simulink.

Стоит отметить, что в полученной модели отсутствуют некоторые элементы (винты, гайки и т.п.), в связи отсутствия у исполнителя, в Inventor, необходимых библиотек компонентов.

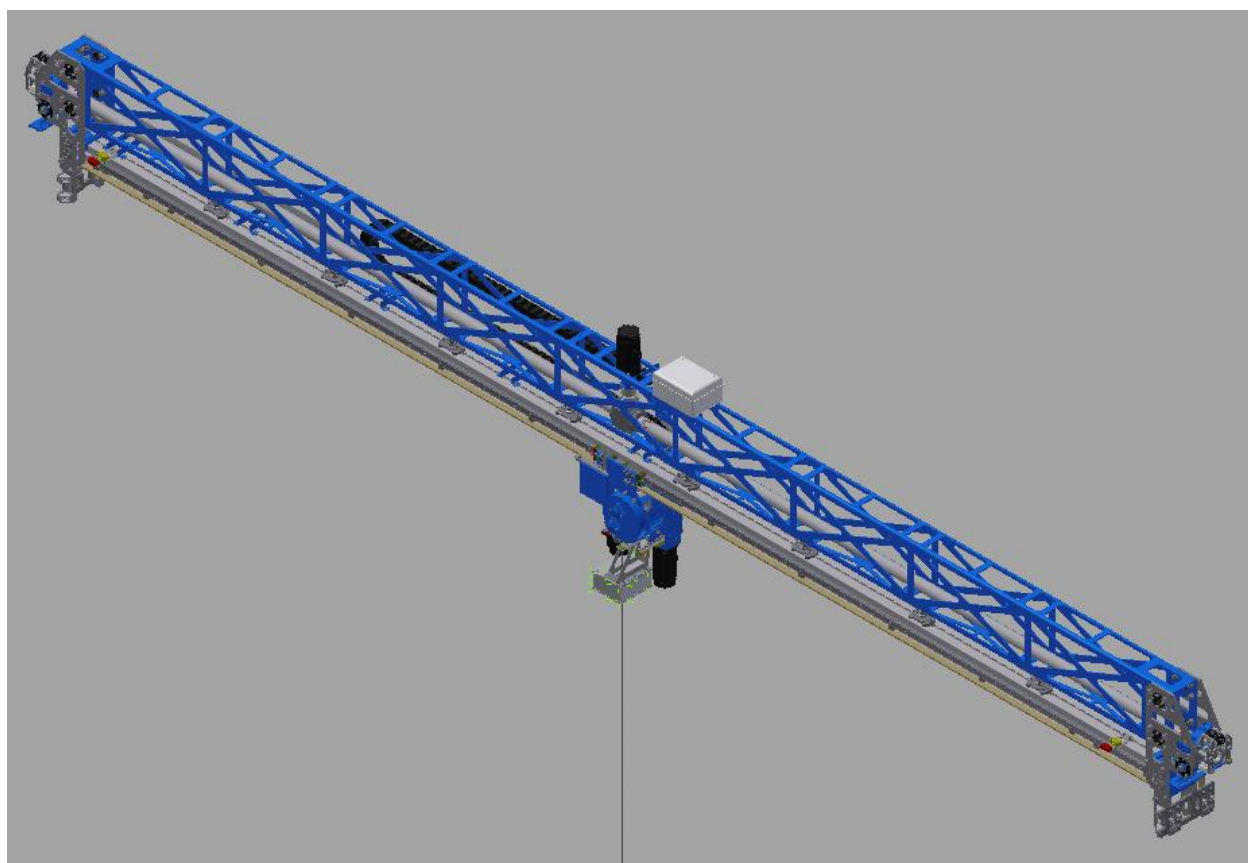


Рисунок 32 – Модель каретки продольной

Первое, что необходимо сделать – это определиться с разделением на движущие составляющие. Достаточным вариантом, на данном этапе, является модель с балкой (продольной кареткой) и поперечной кареткой.

Следующим шагом необходимо упростить модель. Этот шаг необходим в связи с тем, что полученная модель продольной каретки включает в себя подвижные части, такие как кожух для проводов и приводные ремни поперечной каретки, подвижность которых не важна для работы модели в Simulink. Такие детали будут нести лишнюю нагрузку при компиляции и работе итоговой модели.

Покажем детали, которые были убраны из визуализации исходной модели продольной каретки (Рисунки 33-36).

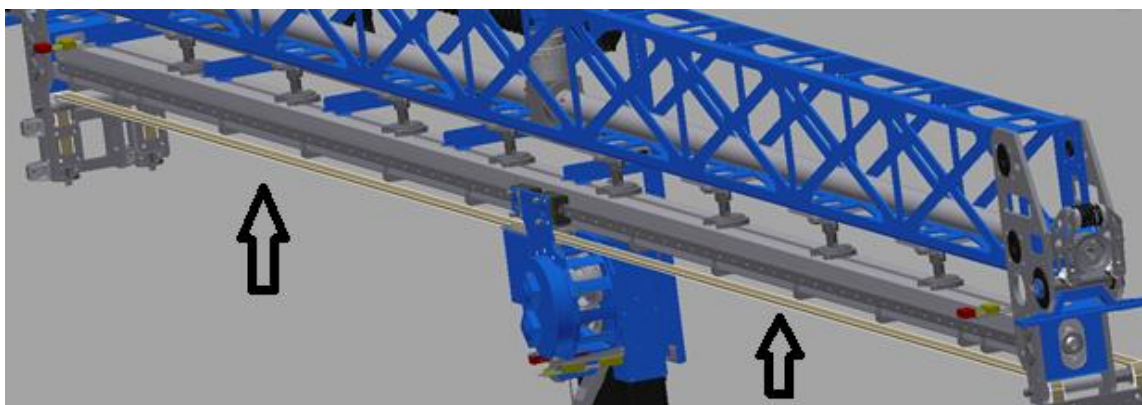


Рисунок 33 – Приводные ремни поперечной каретки

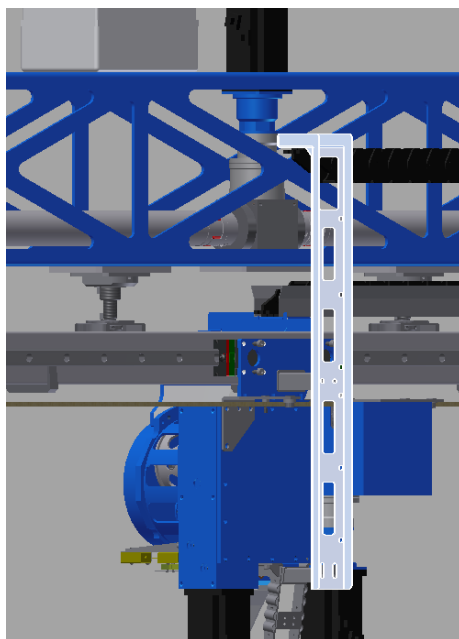


Рисунок 34 – Каркас силовой и управляющей проводки



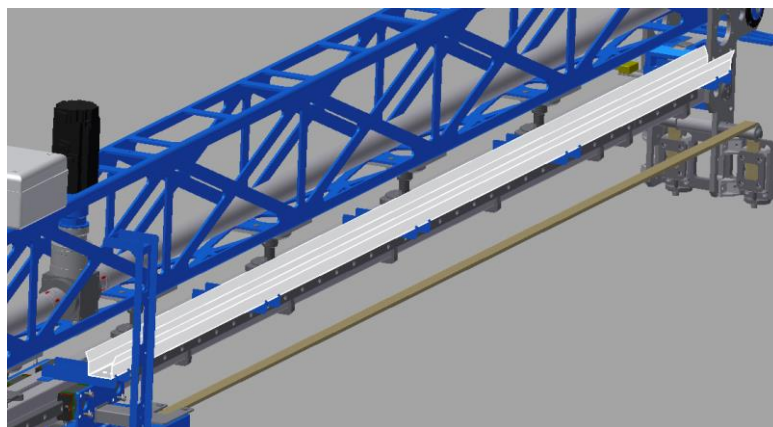


Рисунок 35 – Направляющая кожуха силовой и управляющей проводки

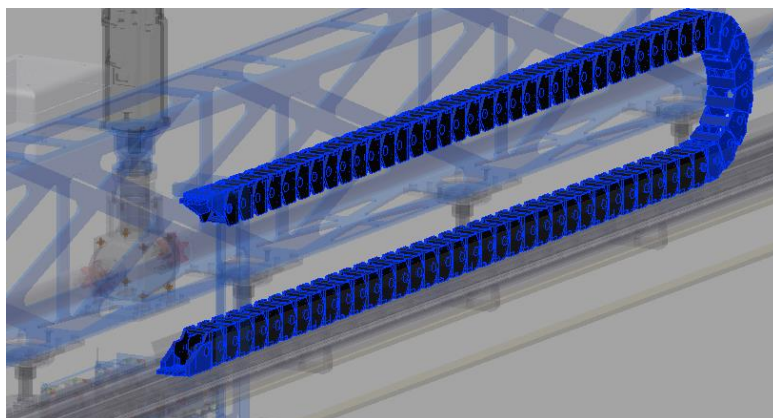


Рисунок 36 – Эластичный кожух силовой и управляющей проводки

В результате упрощения получилась следующая модель (Рисунок 37).

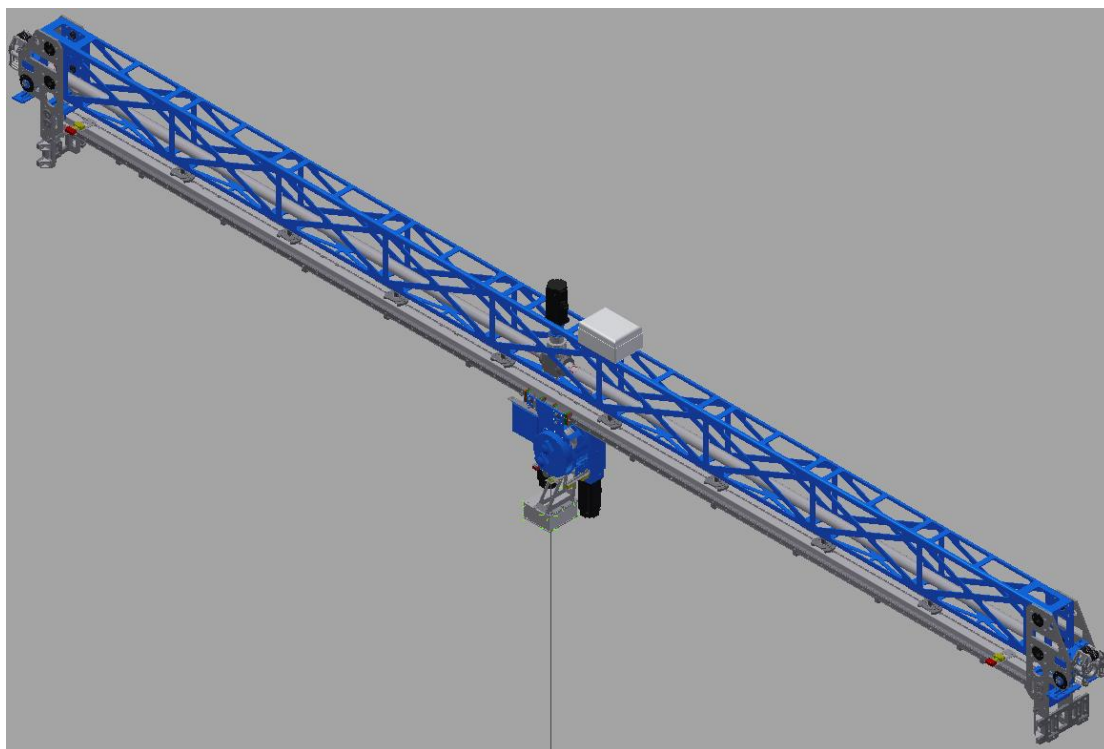


Рисунок 37 – Упрощённая модель продольной каретки



## 4.2 Конвертация составляющих продольной каретки в Simulink

На данном этапе необходимо выделить основные движущиеся элементы продольной каретки: сама продольная и поперечная каретки.

На рисунке 38 выделена продольная каретка с направляющими, по которой будет двигаться поперечная каретка (Рисунок 39). Показанные модели при помощи, встроенной в Inventor функции конвертируются в stl файлы.

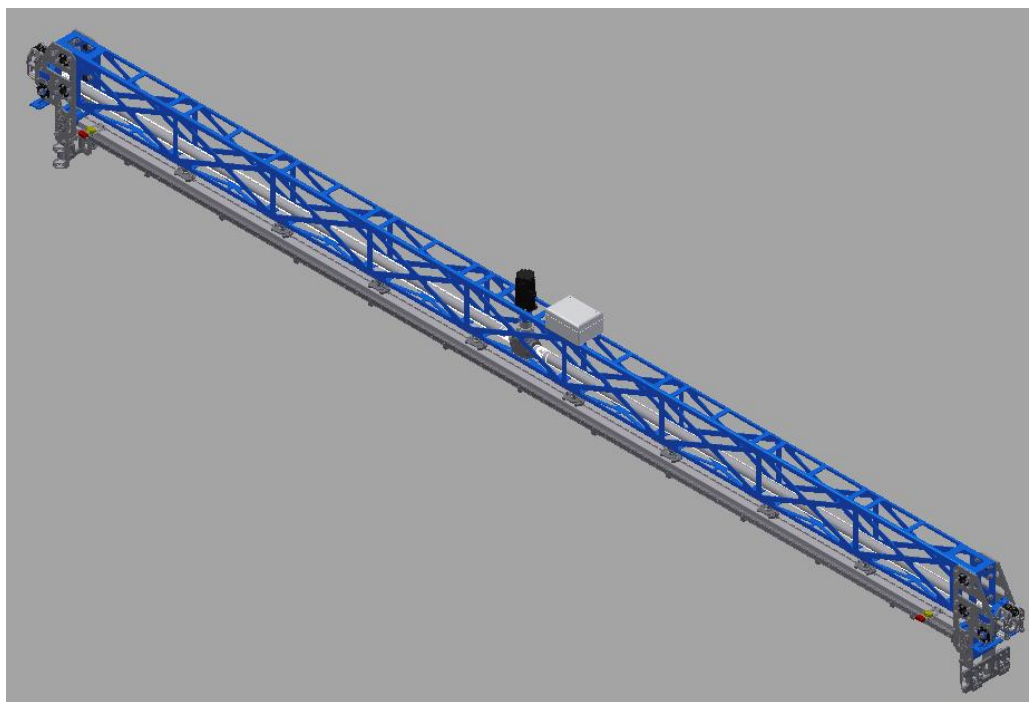


Рисунок 38 – Выделенная продольная каретка

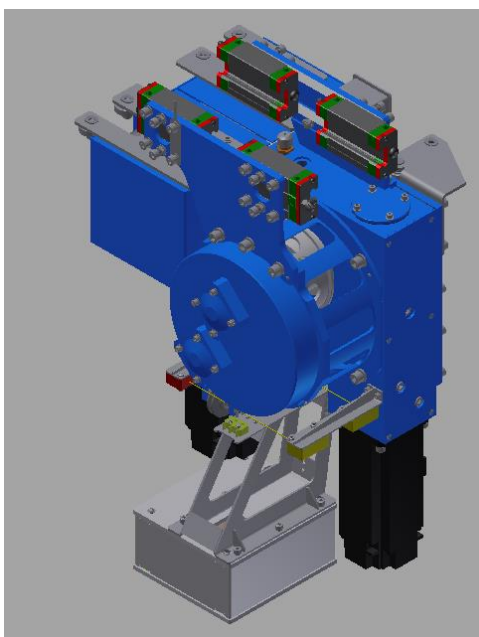


Рисунок 39 – Выделенная поперечная каретка

После создадим шаблон модели, куда внесём созданные stl файлы в блоки Тел BalkaBase и Karetka (Рисунок 40). В результате, в свойствах блоков Тел получим следующее (Рисунки 41 и 42). В созданном шаблоне, отображены степени подвижности продольной и поперечной кареток, блоками Prismatic и Prismatic1.

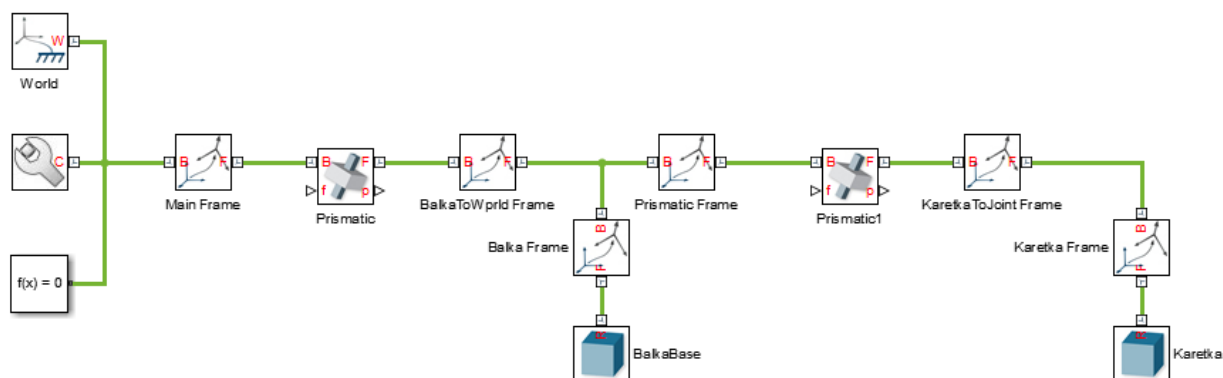


Рисунок 40 – Шаблон модели подвеса КСБ

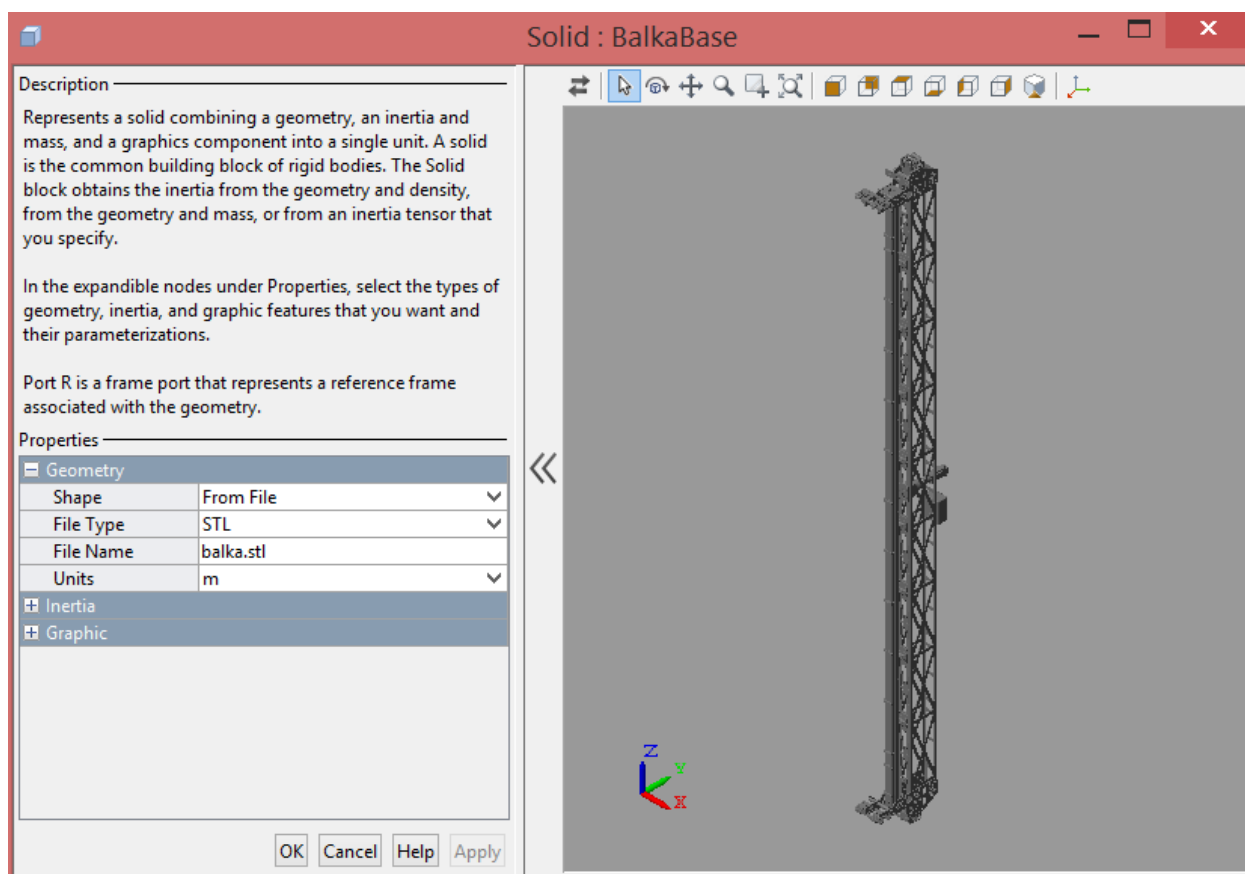


Рисунок 41 – Свойства блока Тела BalkaBase с внесённым stl файлом балки

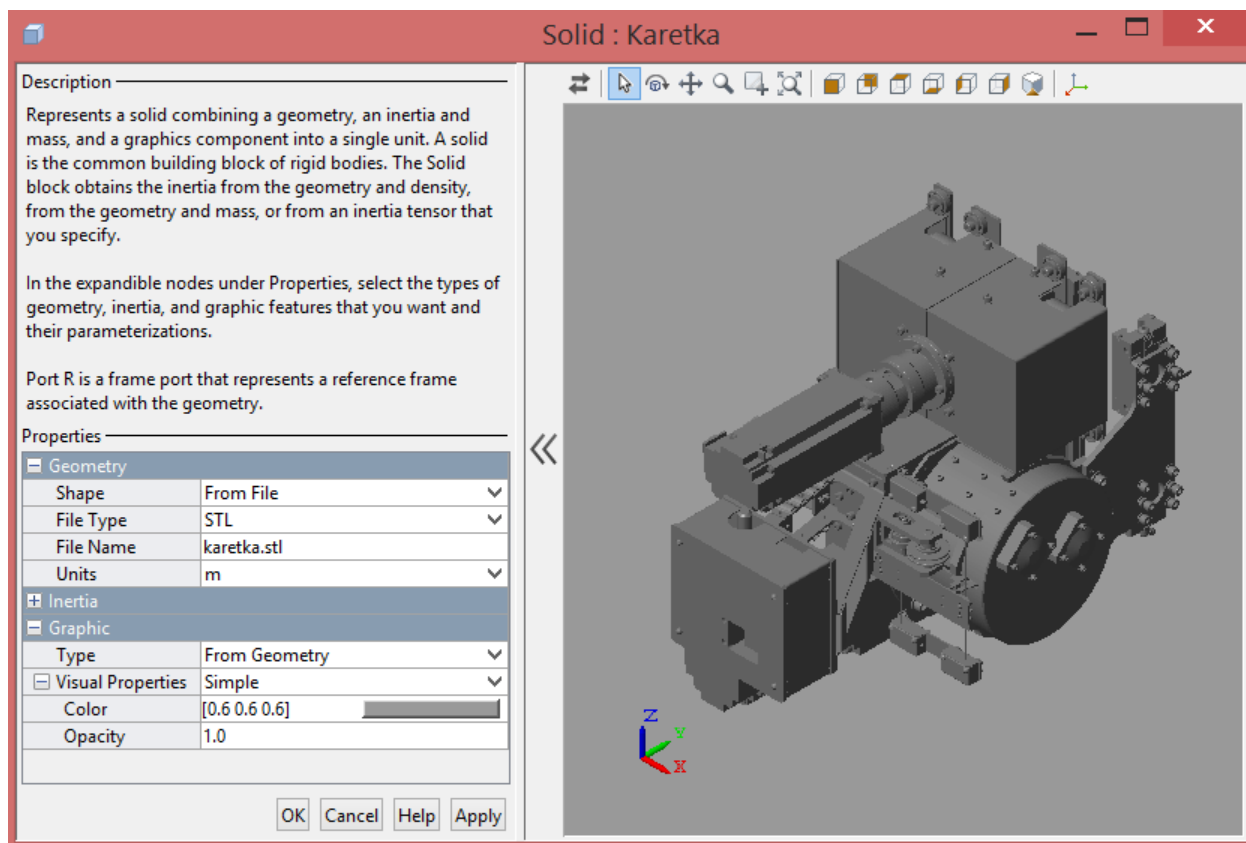


Рисунок 42 – Блок Тела Karetka с внесённым stl файлом каретки

Результирующая модель представлена на рисунке 43.

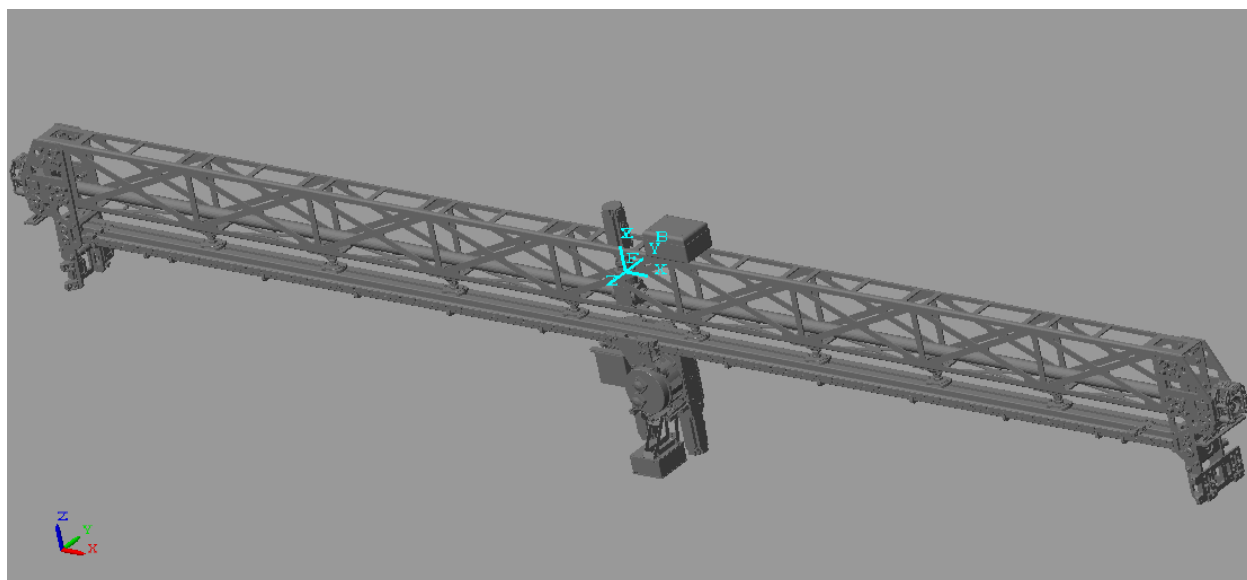


Рисунок 43 – Результирующая модель систмы продольной и поперечной кареток

## **5 Объединение моделей крыла батареи солнечной и системы продольной и поперечной кареток**

Данный раздел призван подробно разобрать процесс объединения моделей и показать результаты работоспособности итоговой модели. По мере выполнения работ, каждая из частей общей модели вносились постепенно. Изначально, проводились работы по отладке подвеса, состоящей из продольной и поперечной каретки. Отладка проводилась на черновой модели КБС типа «Экспресс-2000», процесс создания которой показан во втором разделе данной работы. Далее вносилась система слежения точки вывески за точкой подвеса вместе с приводной частью, предоставленной Ворониным А.В. и Зарнициным А.Ю. Затем была получена итоговая модель КБС типа «Экспресс-2000», созданная Шпякиным И.К., на которой, в дальнейшем, отлаживалась система слежения. Каждый из последующих подразделов описывают процесс создания и отладки модели на каждом из вышеописанных этапов объединения моделей.

### **5.1 Создание шаблона модели стенда обезвешивания крыла**

#### **5.1.1 Формирование неполной модели крыла**

Первое что необходимо сделать, это выделить только одну (корневую) панель всего КБС. Такое упрощение сделано, в связи с тем, что компиляция и отработка модели выполняются значительно быстрее, без лишней нагрузки на ЭВМ. В качестве исходной была взята модель «Экспресс-2000», созданная во втором разделе данной работы (Рисунок 31).

Результатом является следующий шаблон модели (Рисунки 44 и 45).

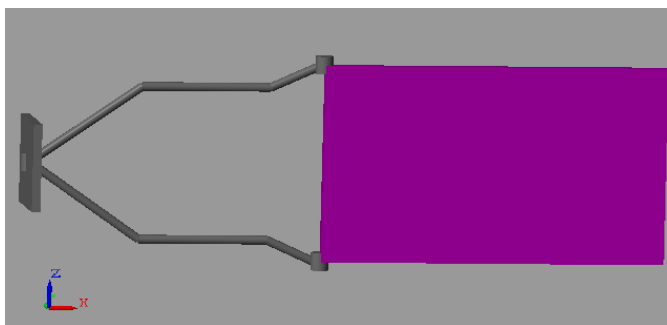


Рисунок 44 – Визуализация модели рамы и корневой панели КБС

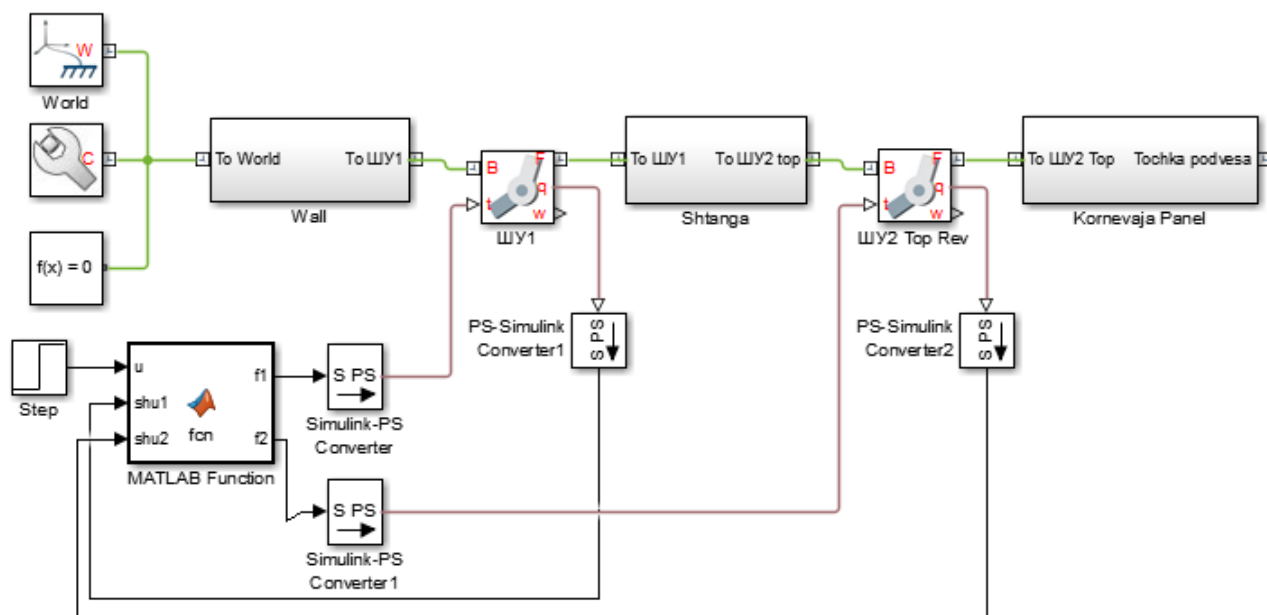


Рисунок 45 – Модель рамы и корневой панели КБС

### 5.1.2 Внесение системы продольной и поперечной кареток

Следующим шагом добавим к модели КСБ систему продольной и поперечной каретки, созданной в третьем разделе данной работы (Рисунки 40 и 43). В результате получим модель, представленную на рисунках 46 и 47.

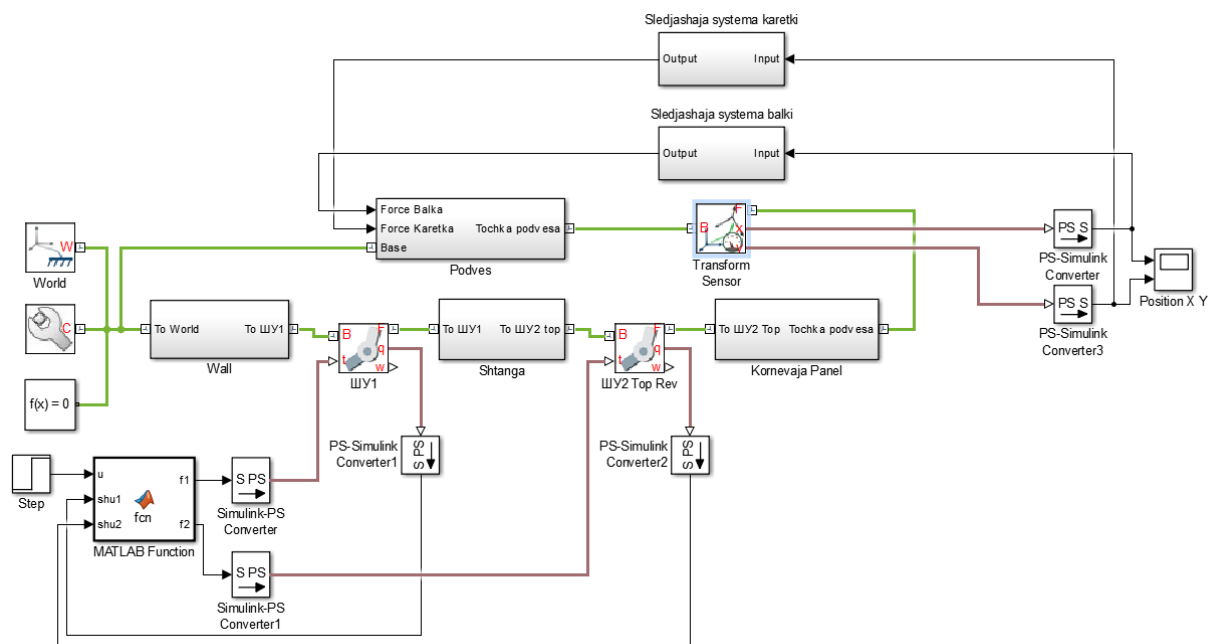


Рисунок 46 – Объединённая модель КБС и системы подвеса с внесённой системой слежения в Simulink

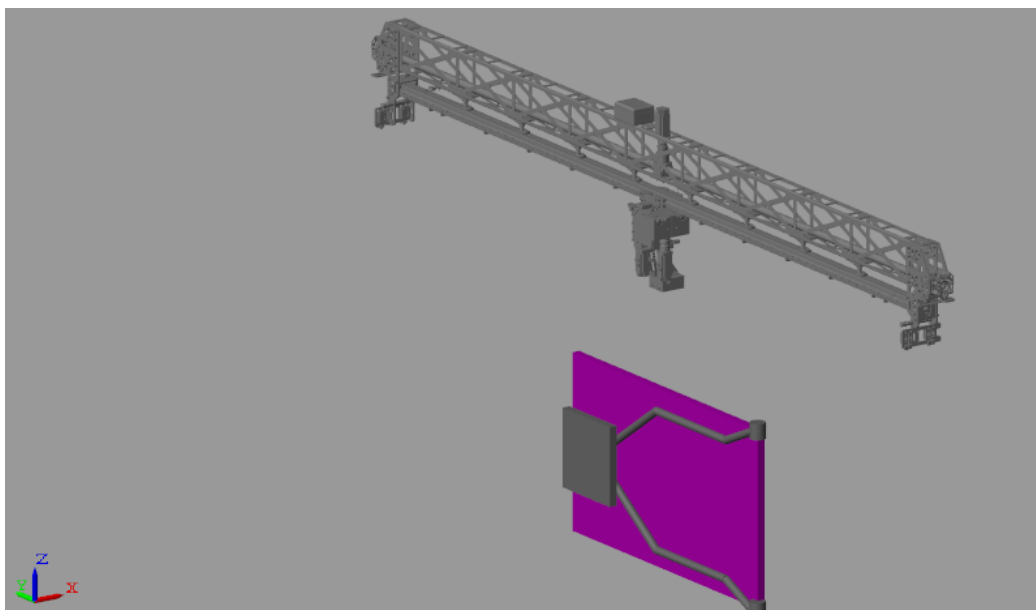


Рисунок 47 – Визуализация объединённой модели

### 5.1.3 Назначение блоков объединённой модели

Подробное пояснение структуры модели КБС опустим, так как в дальнейшем будет внедрена итоговая модель, предоставленная Шпякиным И.К. Поясним назначение каждого из блоков, приведённых на рисунке 46.

- Подсистема Wall, представляет собой макет стены, к которой крепится, в пространстве, части модели КБС.
- Блок ШУ1 – сочленение с одной вращательной степенью подвижности. В данной модели играет роль первого шарнирного устройства, обеспечивающее угловое раскрытие панели.
- Подсистема Shtanga – модель штанги КБС, собранная из нескольких блоков тел.
- Блок ШУ2 – сочленение с одной вращательной степенью подвижности. В данной модели играет роль второго шарнирного устройства, обеспечивающее раскрытие панели.
- Подсистема Kornevaja Panel – модель корневой панели КБС.
- Блоки Step и Matlab Function моделируют приводную систему КБС и систему зачековки панелей.

- Блоки Simulink-PS Converter и PS-Simulink Converter отвечают за конвертацию сигналов между стандартными библиотеками Simulink и библиотекой SimScape.

Перейдём к пояснению подсистемы Podves (Рисунок 48).

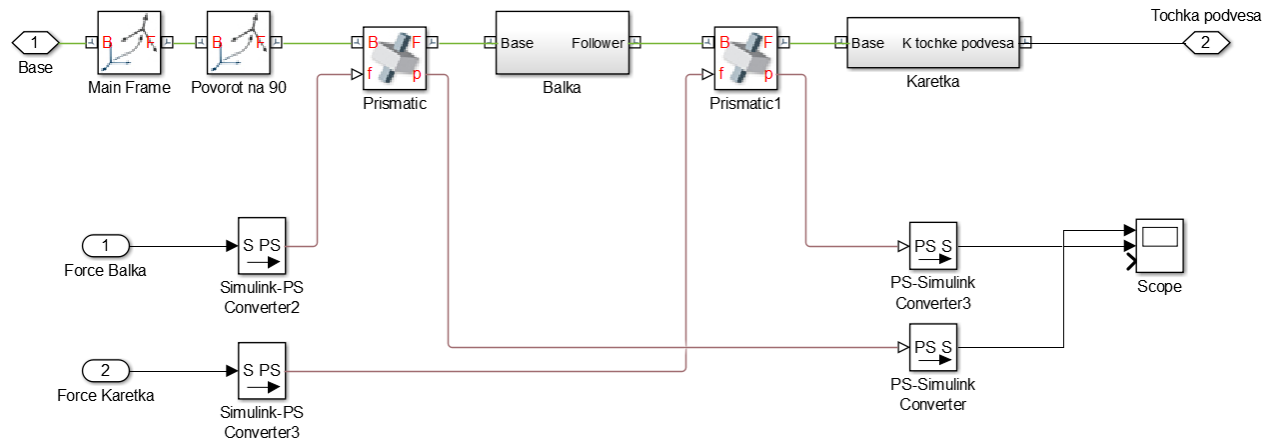


Рисунок 48 – Устройство блока Podves

Поясним назначение, каждого из блоков подсистемы Podves, приведённых на рисунке 48.

- Блок Main Frame – блок жёсткой СК, который представляет собой коренную СК, соединённую с мировой через порт 1 «Base». В свойствах этого блока (Рисунок 49) вкладка Rotation отвечает поворот по положительной оси X для корректной ориентации всей модели подвеса, а вкладка Translation – за перенос всего подвеса в пространстве на необходимое нам расстояние от модели КБС.

Properties		
Rotation		
Method	Standard Axis	
Axis	+X	
Angle	90	deg
Translation		
Method	Cartesian	
Offset	[95 -1410 4120]	mm

Рисунок 49 – Свойства блока Main Frame

- Блок **Povorot na 90** – блок жёсткой СК, обеспечивающий корректную ориентацию модели каретки в рабочем пространстве. В его свойствах выставлен поворот по положительной оси  $Y$  на 90 градусов.
- Блок **Prismatic** – сочленение с одной поступательной степенью подвижности, которое обеспечивает перемещение всех последующих СК по оси  $Z$  относительно предыдущей СК. В данном случае степень свободы необходима для реализации перемещения продольной каретки.
- Блок **Prismatic1** – Выполняет аналогичную функцию, только в данном случае степень свободы необходима для реализации перемещения поперечной каретки.
- Подсистема **Balka** (Рисунок 50) – является моделью продольной каретки.
  - Блок СК **BalkaToWorld Frame** – обеспечивает корректное позиционирование продольной каретки в рабочем пространстве.
  - Блок СК **Balka Frame** – является центром масс модели продольной каретки, а также обеспечивает корректное отображение визуализации каретки в рабочем пространстве.
  - Блок **BalkaBase** – является моделью продольной каретки. В этом блоке заложена ссылка на файл `balka.stl`, который является конвертацией с модели, предоставленной КТИ НП. Подробнее в разделе 4.2.

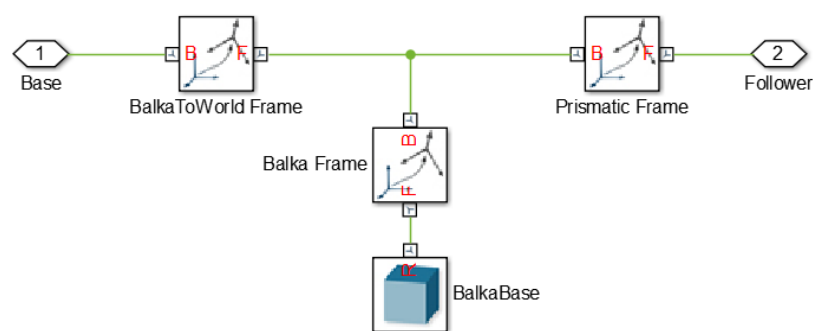


Рисунок 50 – Устройство подсистемы Balka

- Блок **Prismatic Frame** – является опорной СК, относительно которой будет перемещаться поперечная каретка. В свойствах блока выставлен поворот СК на 90 градусов по положительной оси  $Y$ , для



обеспечения корректной ориентации осей для движения поперечной каретки.

- Подсистема Karetka (Рисунок 51) – является моделью поперечной каретки. Устройство подсистемы, как и назначение блоков, практически не отличается от подсистемы Balka. Блок жёсткой СК Tochka podvesa ориентировочно размещён в точке вывески на поперечной каретке. Эта СК в дальнейшем будет необходима для формирования следящей системы.

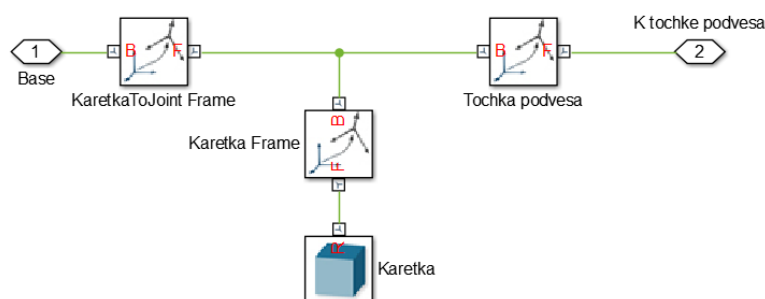


Рисунок 51 – Устройство подсистемы Karetka

В результате получилась визуализированная модель, представленная на рисунке 47.

#### 5.1.4 Система слежения

Перейдём к разъяснениям группы блоков, отвечающих за систему слежения. Для начала, остановимся на пояснении функций блока Transform Sensor, показанного на рисунке 52 и 53.

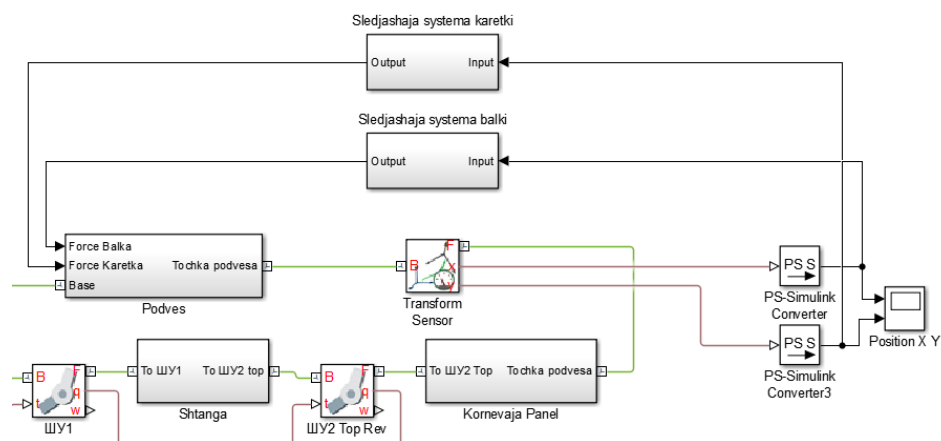


Рисунок 52 – Выделенная система слежения в Simulink

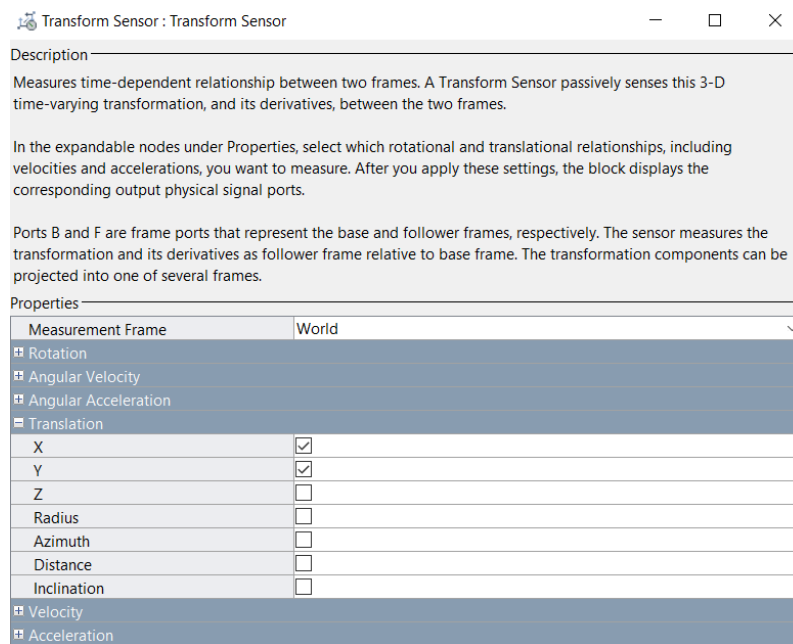


Рисунок 53 – Свойства блока Transform Sensor

Основной задачей блока Transform Sensor является определение разницы по положению в пространстве между двумя, прикреплёнными к портам Base и Follower, СК. В нашем случае это точкой подвеса на корневой панели (Рисунок 54 а,б) и точкой вывески на каретке (Рисунок 54 а,б).

В соответствии с мировой СК, необходимо снимать разницу положения в пространстве по оси X для продольной каретки и по оси Y для поперечной каретки (Рисунок 53).

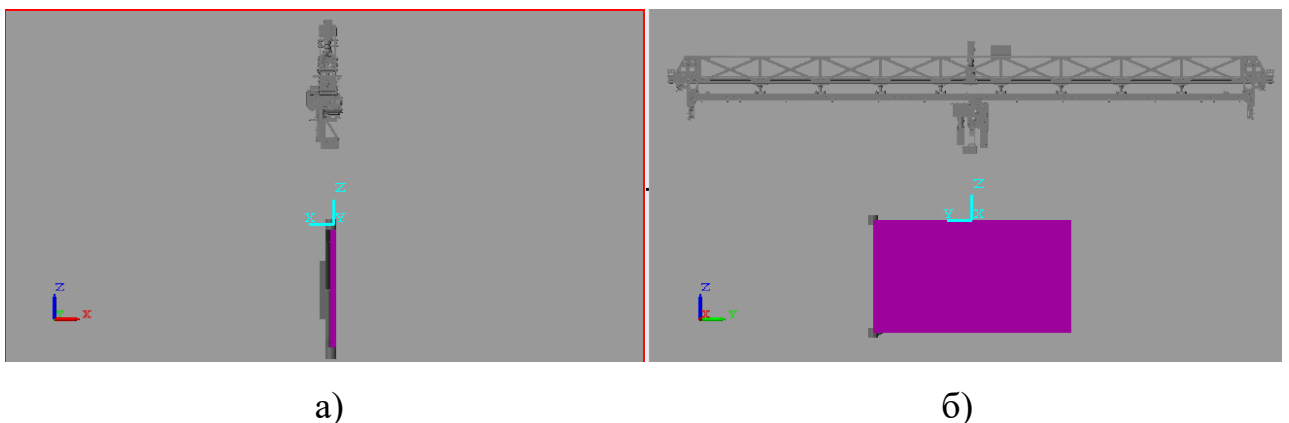
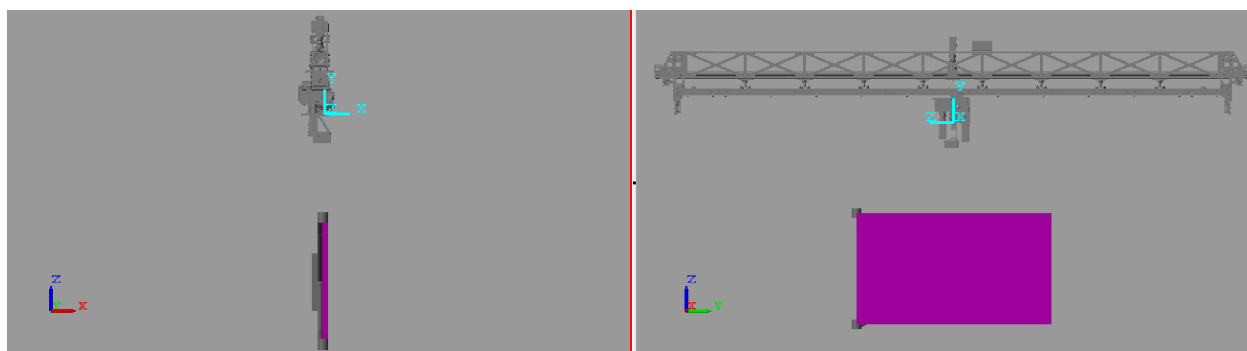


Рисунок 54 – Точка подвеса на корневой панели



а)

б)

Рисунок 55 – Точка вывески на каретке

Затем, для того чтобы привести в движение полученную модель, необходимо приложить к ней какое-либо усилие. В нашем случае этими усилиями являются модели приводов (Рисунок 56), для каждой из кареток. Модель предоставлена Ворониным А.В. и Зарницыным А.Ю.

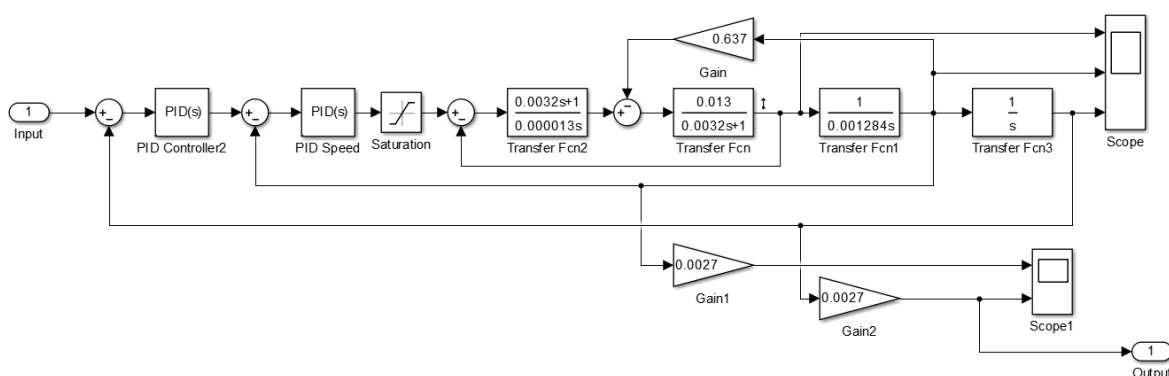


Рисунок 56 – Модель аperiodического звена второго порядка

На вход представленной модели подаётся разница между координатами точек подвеса и вывески, а на выходе выдаётся сигнал о необходимом перемещении, сообщаемый продольной и поперечной кареткам.

В связи с тем, что черновая версия КБС не отвечает требованиям, заявленным в ТЗ, дальнейшая отладка системы слежения была отложена до получения итоговой модели КБС типа «Экспрес-2000».

## 5.2 Объединение итоговой модели крыла батареи солнечной типа «Экспресс-2000», подвеса и следящей системы

### 5.2.1 Внедрение итоговой модели крыла

После получения итоговой модели КБС (Приложение Б), которая в значительно большей мере отвечает требованиям технического задания, была произведена её интеграция вместо отладочной модели КБС. Опишем все произошедшие изменения с итоговой моделью (Приложение В).

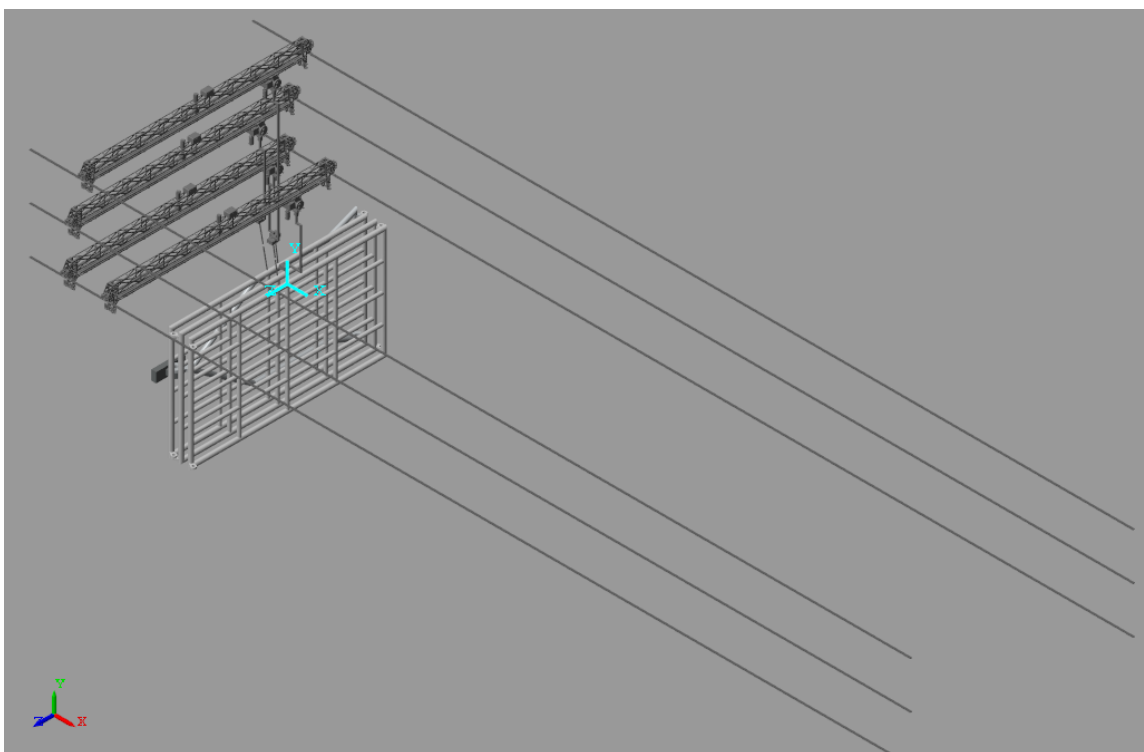


Рисунок 57 – Визуализация результата объединения моделей подвеса, следящей системы и КБС, отвечающей требованиям ТЗ

Подробное описание итоговой модели и её функционала опустим, так как она создавалась другим сотрудником, ответственным за моделирование КБС. Кратко поясним назначение каждого из блоков объединённой модели (Приложение В):

- Блок Transform – является коренной СК для всей модели стенда обезвешивания.
- Подсистема Base\_1\_RIGID – отвечает за модель опоры, к которой крепится КБС в рабочем пространстве.

- Блоки Revolute, Revolute1, Revolute2 и Revolute 3 – отвечает за модели ШУ1, ШУ2, ШУ3 и ШУ4, соответственно.
- Группы блоков Spring и Subsystem отвечают за описание характеристик ШУ и систем синхронизации для каждого из ШУ, соответственно.
- Подсистема Shaft\_1\_RIGID (Рисунок 58) – отвечает за модель штанги КБС. В подсистему добавлена дополнительная СК (Transform3), отвечающая за точку крепления подвеса к штанге (Рисунки 59 и 60).

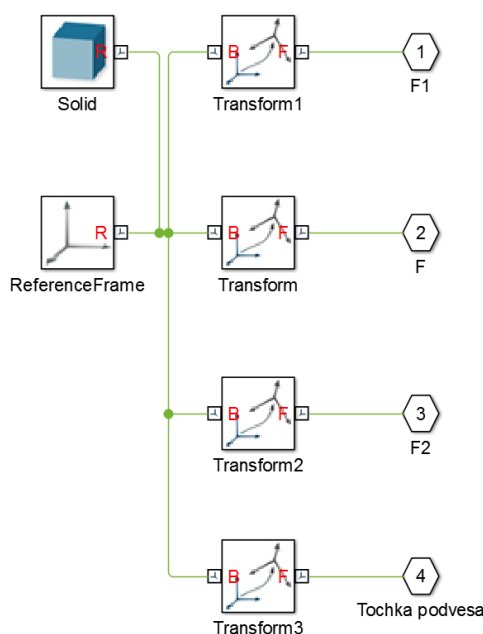


Рисунок 58 – Устройство подсистемы Shaft\_1\_RIGID

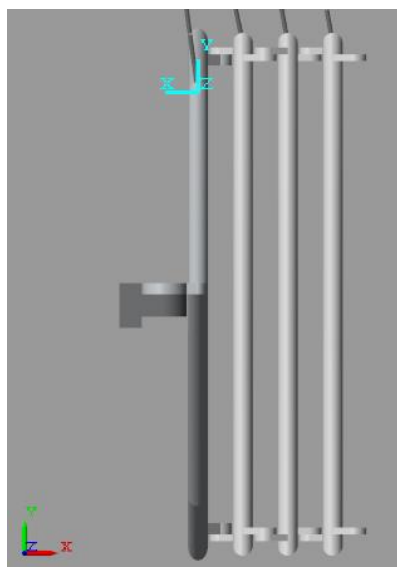


Рисунок 59 – Расположение точки крепления подвеса на штанге КБС  
(профильная плоскость)

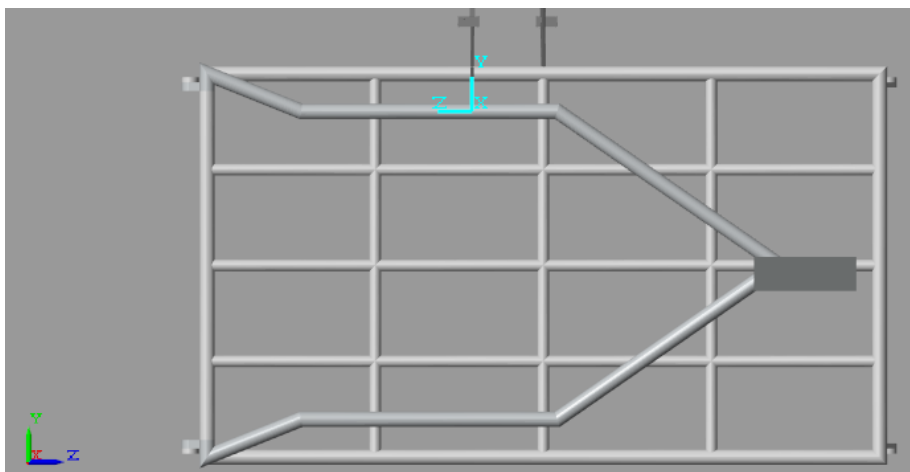


Рисунок 60 – Расположение точки крепления подвеса на штанге КБС  
(фронтальная плоскость)

- Подсистемы Array\_1\_1\_RIGID (Рисунки 61 и 62), Array\_2\_1\_RIGID (Рисунки 63 и 64) и Array\_2\_2\_RIGID (Рисунки 65 и 66) – отвечают за модели корневой, промежуточной и концевой панелей КБС, соответственно. Устройство их подсистем аналогично представленному на рисунке 58, устройству подсистемы штанги. В каждый из блоков добавлена дополнительная СК, отвечающая за точку крепления подвеса к обезвешиваемой части КБС.

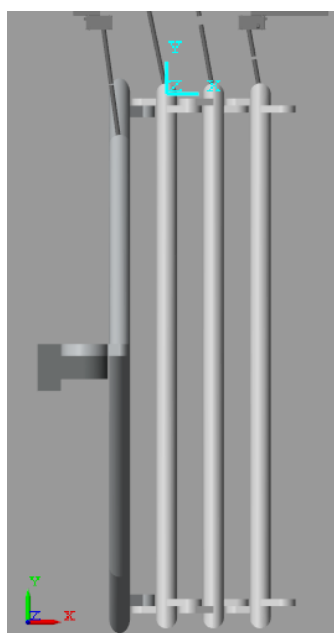


Рисунок 61 – Расположение точки крепления подвеса на корневой панели КБС  
(профильная плоскость)

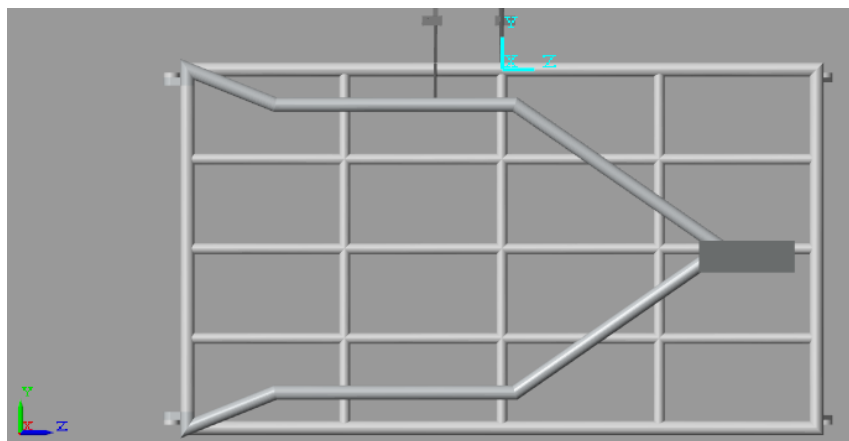


Рисунок 62 – Расположение точки крепления подвеса на корневой панели КБС (фронтальная плоскость)

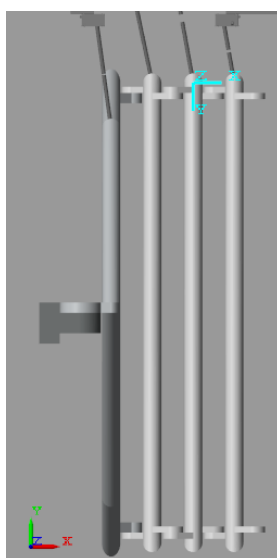


Рисунок 63 – Расположение точки крепления подвеса на промежуточной панели КБС (профильная плоскость)

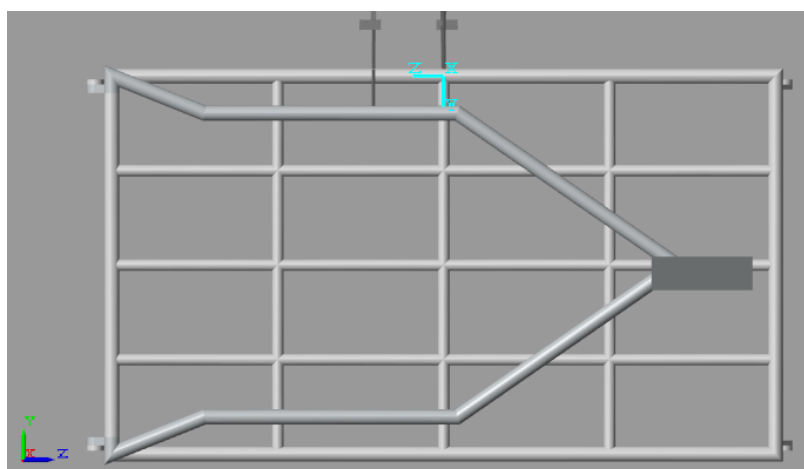


Рисунок 64 – Расположение точки крепления подвеса на промежуточной панели КБС (фронтальная плоскость)

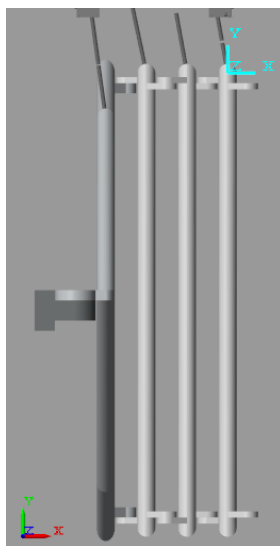


Рисунок 65 – Расположение точки крепления подвеса на концевой панели КБС  
(профильная плоскость)

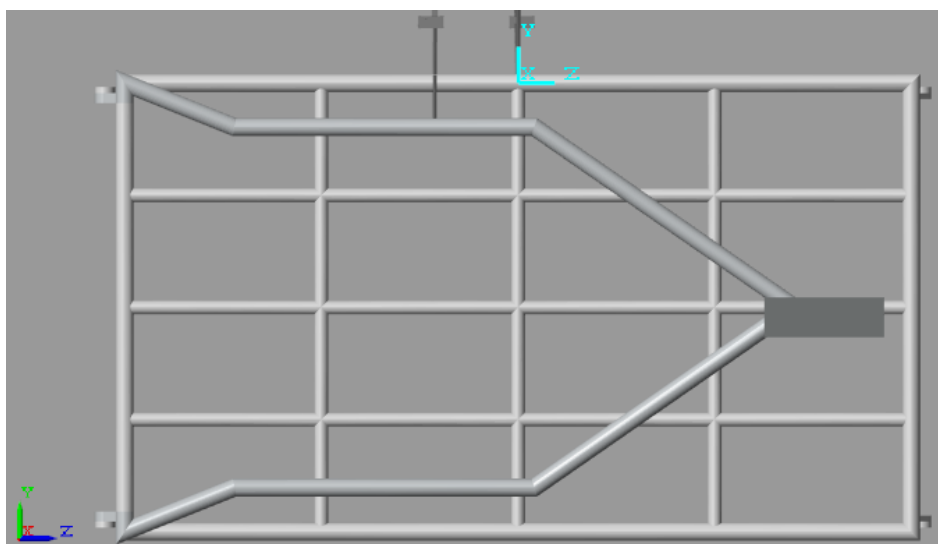


Рисунок 66 – Расположение точки крепления подвеса на концевой панели КБС  
(фронтальная плоскость)

### 5.2.2 Внедрение системы продольных и поперечных кареток

Перейдём к пояснению изменений, касающихся системы продольных и поперечных кареток или для краткости системы подвесов. Из приложения В видно, что блок подвеса был размножен и прикреплён к каждому из обездвешиваемых частей КБС. Устройства каждой из этих подсистем практически идентичны (Рисунок 67), за исключением введения трёх уровней



расположения кареток и изменения поперечных кареток (к каждой из кареток добавлены кронштейны).

Устройство подсистемы, представленное на рисунке 67, является аналогом следящей системы (Рисунок 52), отлаживаемой на черновом варианте КБС. Разъясним основные изменения, начиная с аналогов уже описанных блоков, и далее опишем нововведения.

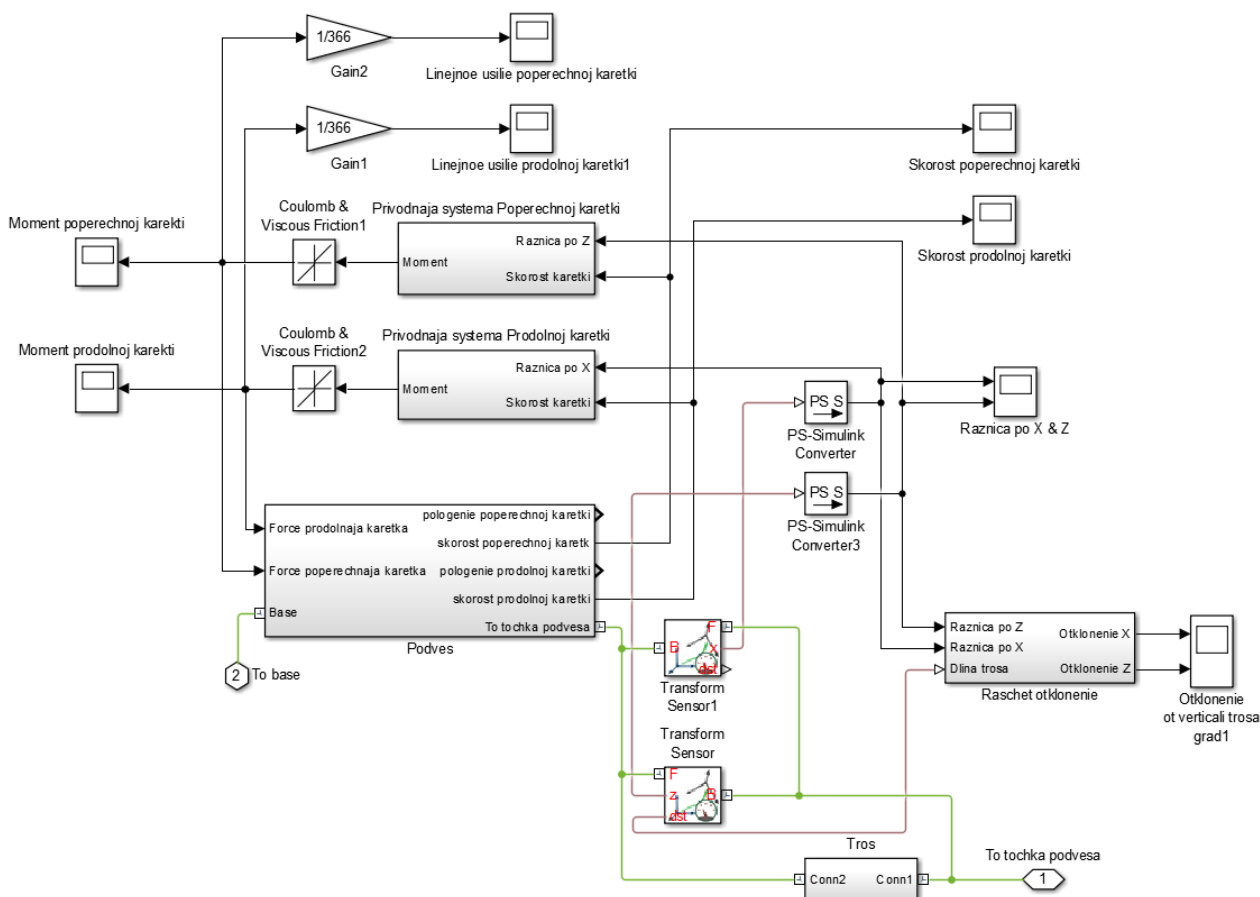


Рисунок 67 – Устройство подсистемы Podves1

Начнём с изменений, коснувшихся устройства подсистемы Podves (Рисунок 68), по сравнению с ранее описанной на рисунке 48. Как уже было сказано, к каждой из обезвешиваемых частей КБС был добавлен свой подвес. В связи с этим была реализована трёхуровневая система направляющих, за которые отвечает подсистема Napravljajushie (Рисунок 69). Визуализация направляющих показана на рисунке 57. Расстояние между направляющими установлено в соответствии с предоставленной технической документацией стенда обезвешивания от КТИ НП.

Каждый из блоков СК, показанный на рисунке 69 (Main Frame Naprav), отвечает за позиционирование направляющей в рабочем пространстве. Блоки тел Naprav, отвечают за модели самих направляющих. Длина направляющих была выбрана таким образом, чтобы во время отработки модели, каретки постоянно находились на направляющих.

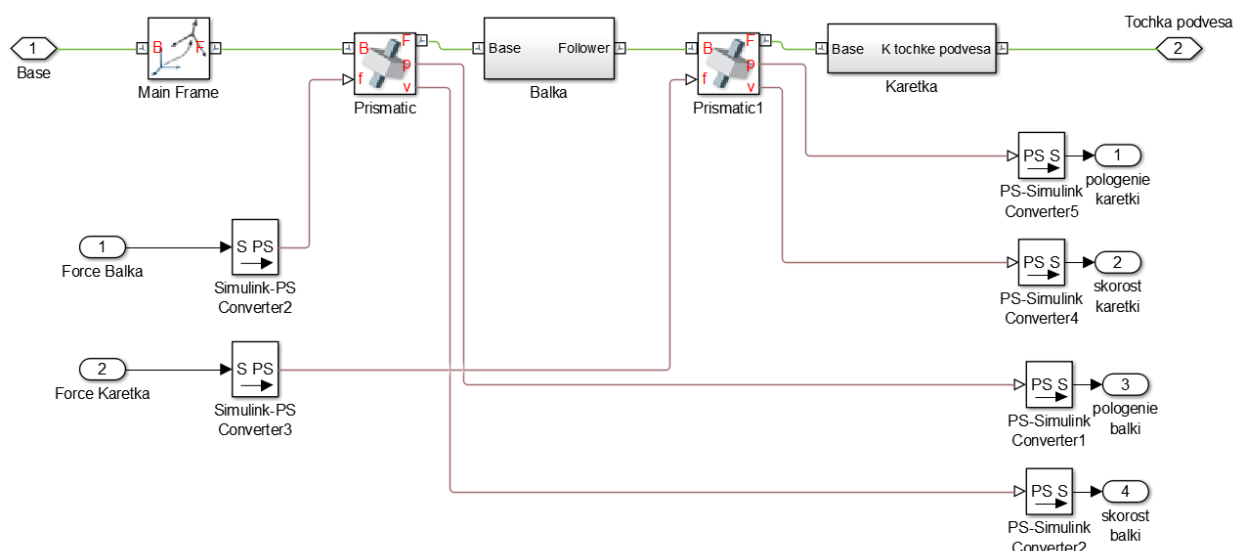


Рисунок 68 – Устройство подсистемы Podves для штанги КБС

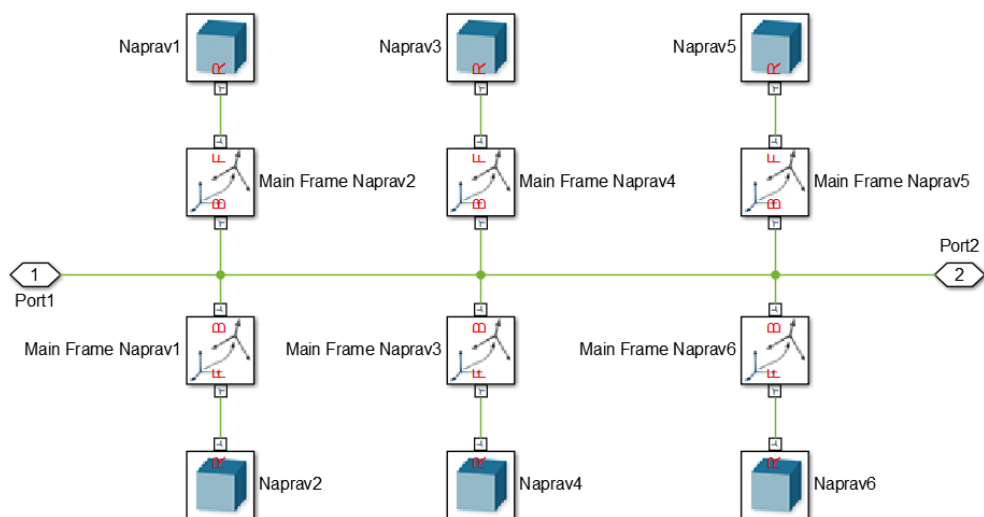


Рисунок 69 – Устройство подсистемы Napravljaushie

Каретки штанги и концевой панели расположились на нижнем уровне, корневой панели – на среднем уровне, а промежуточной панели – на верхнем уровне (Рисунок 57). В блоках Main Frame каждого из подвесов введены соответствующие координаты положения кареток в рабочем пространстве.

Стоит отметить, что блоки Main Frame и Povорот на 90 (Рисунок 48) были объединены в новой вариации модели станда, т.е. корректная ориентация кареток в рабочем пространстве теперь обеспечивается только одним блоком Main Frame.

Подсистема продольной каретки (Balka) не претерпела никаких изменений. Подсистема поперечной каретки (Karetka) незначительно изменилась. В соответствии с технической документацией, предоставленной КТИ НП, каждая из поперечных кареток была изменена в Autodesk Inventor, путём добавления модели кронштейнов, повторяющих форму и основные габариты (Рисунки 70-73). В связи с отсутствием моделей кронштейнов среды Inventor (имелись только чертежи формата dwg), перенос точных моделей в Matlab при помощи SimMechanics Link не был возможен. Имея только информацию об основных габаритах и форме кронштейнов, было решено не отображать их излишне детализированными.

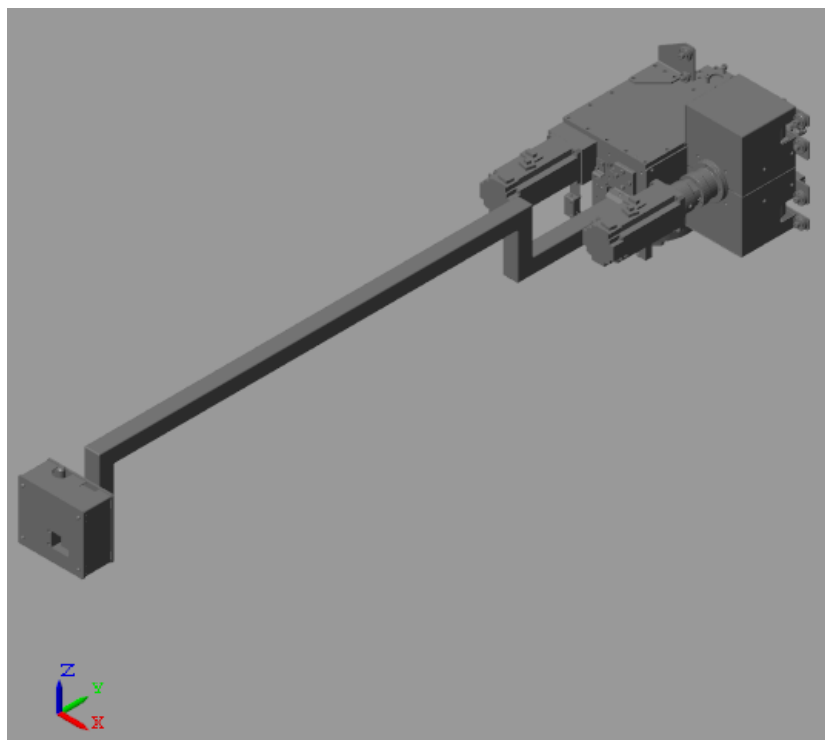


Рисунок 70 – Поперечная каретка с кронштейном подвеса штанги

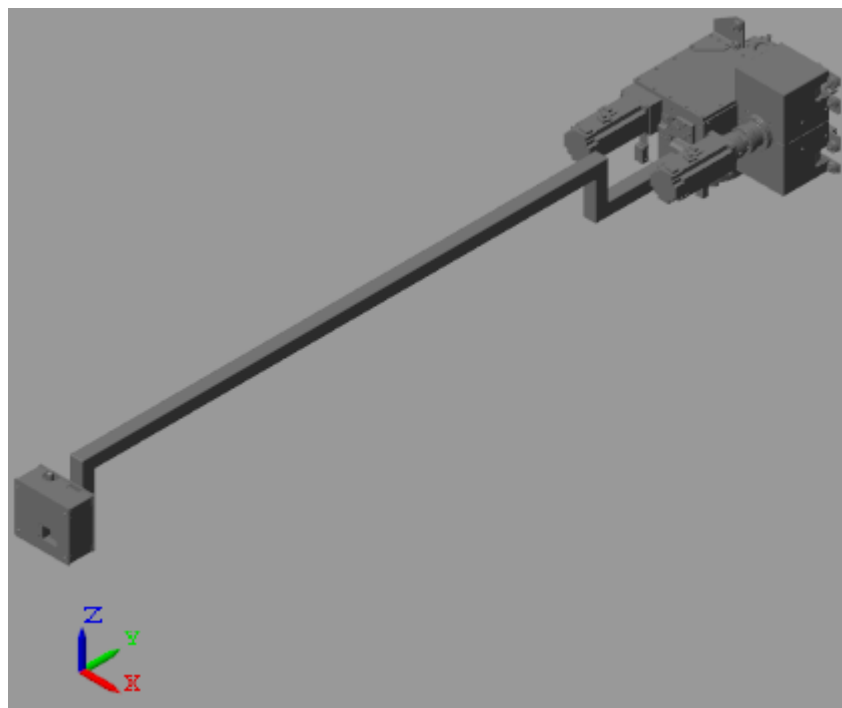


Рисунок 71 – Поперечная каретка с кронштейном подвеса корневой панели

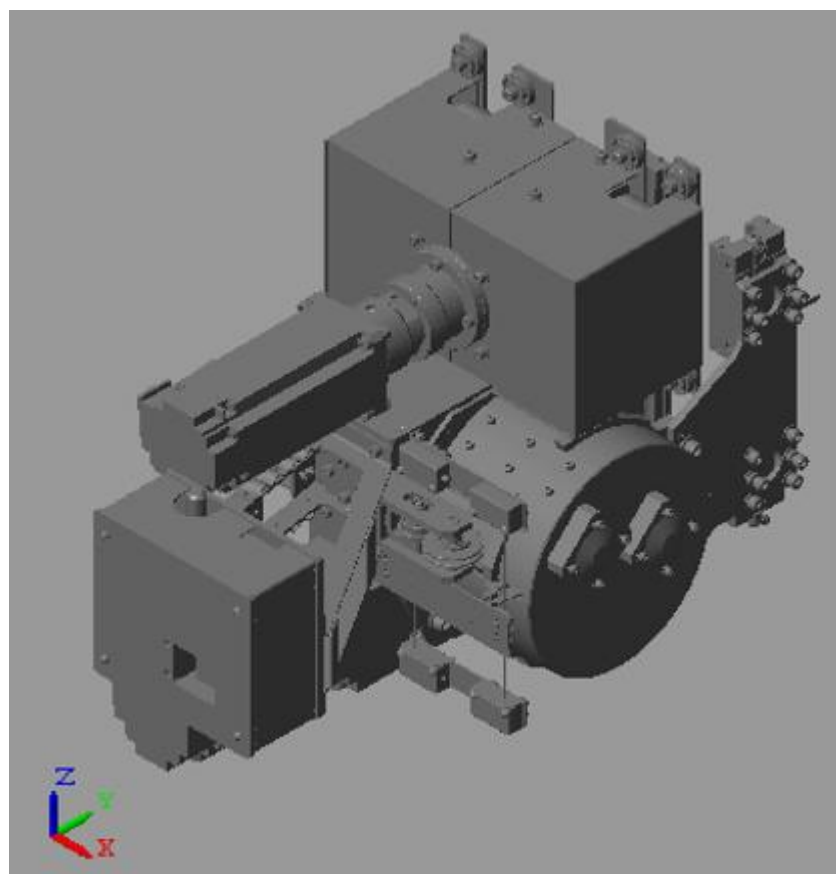


Рисунок 72 – Поперечная каретка с кронштейном подвеса промежуточной панели

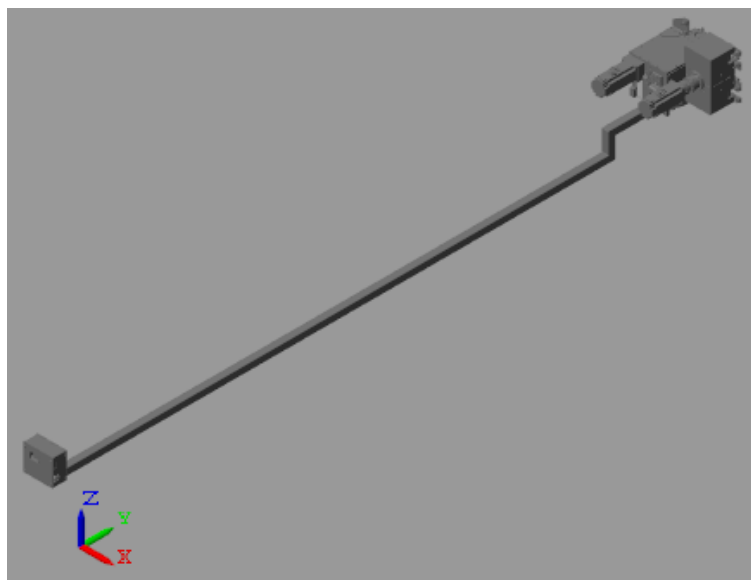


Рисунок 73 – Поперечная каретка с кронштейном подвеса концевой панели

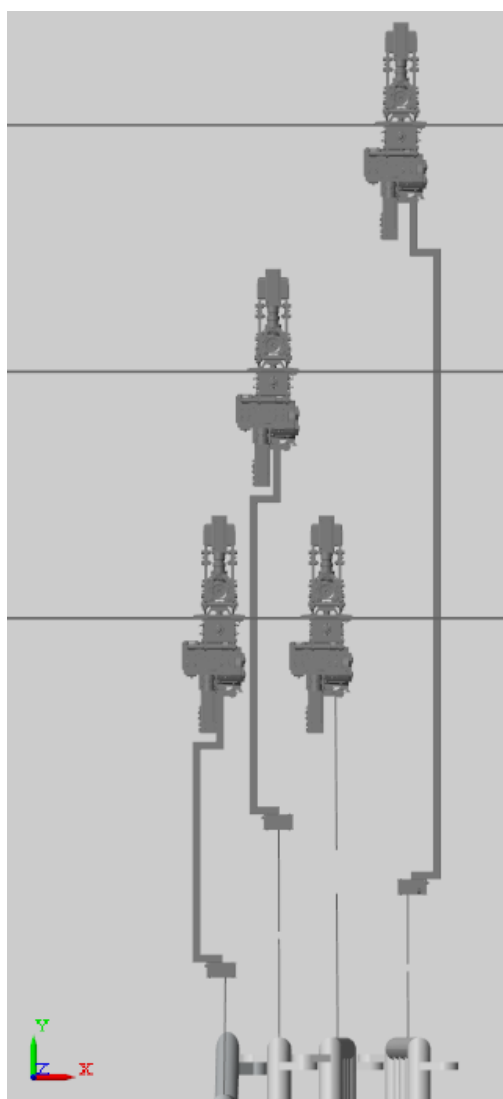


Рисунок 74 – Расположение поперечных кареток в начальный момент моделирования

### 5.2.3 Внедрение следящей системы

Для начала, поясним причину дублированного блока Transform Sensor (Рисунок 67).

При первом моделировании обнаружилась неисправность, в результате которой каждая из поперечных кареток выходила за позволенные границы продольных кареток (Рисунок 75) и двигалась далее до окончания процесса моделирования.

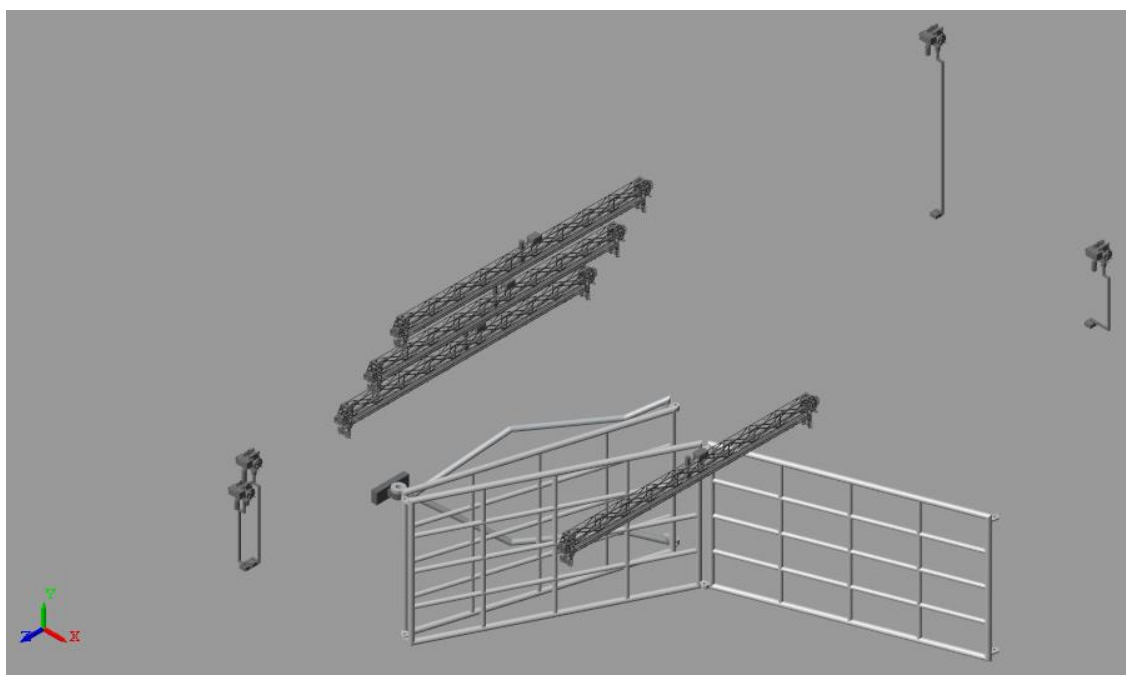


Рисунок 75 – Поперечные каретки, выходящие за границы продольных кареток

Первое предположение заключалось в изменении базовой системы координат, в результате чего были изменены основные оси, по которым двигались продольная (ось X) и поперечная (ось Z) каретки, но это решение не помогло. Дальнейший перебор разнообразных комбинаций направления осей СК точек подвеса и вывески так же не дал никаких результатов.

Следующей идеей, было изменение относительного направления слежения. Изначально, блок Transform Sensor1 определял разницу по осям, при базовой (Base) точке вывески на каретке и последовательной (Follower) точки подвеса на панели (Рисунок 76). Изменив направление на обратное, оказалось, что теперь поперечная каретка корректно отслеживает точку подвеса, а

продольная каретка выходит за определённые границы и продолжает двигаться до окончания процесса моделирования.

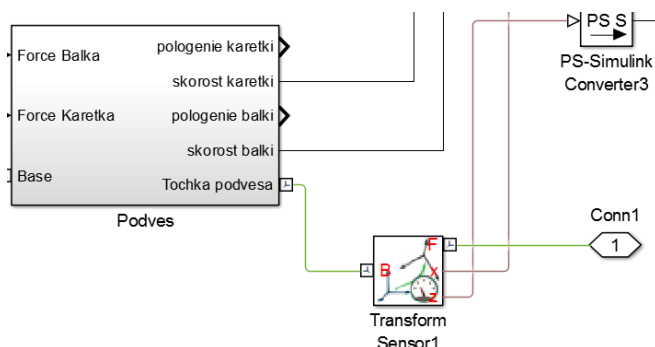


Рисунок 76 – Расположение блока Transform Sensor в первоначальном варианте модели

В итоге, было принято решение ввести в следящую систему дополнительный блок Transform Sensor с другой ориентацией (Рисунок 67), в результате чего модель стала функционировать корректно.

Принцип работы блока Transform Sensor уже разбирался ранее на этапе рассмотрения следящей системы отладочной модели КБС. Отметим только, что информация, получаемая о разнице координат точки подвеса на обезвешиваемой части КБС и точке вывески на поперечной каретке, подаётся на подсистемы Privodnaja systema, где обрабатывается и поступает как линейное усилие, приводящее в движение продольную и поперечные каретки соответственно (Рисунок 78).

Обновлённое устройство подсистем Privodnaja systema представлено на рисунке 77.

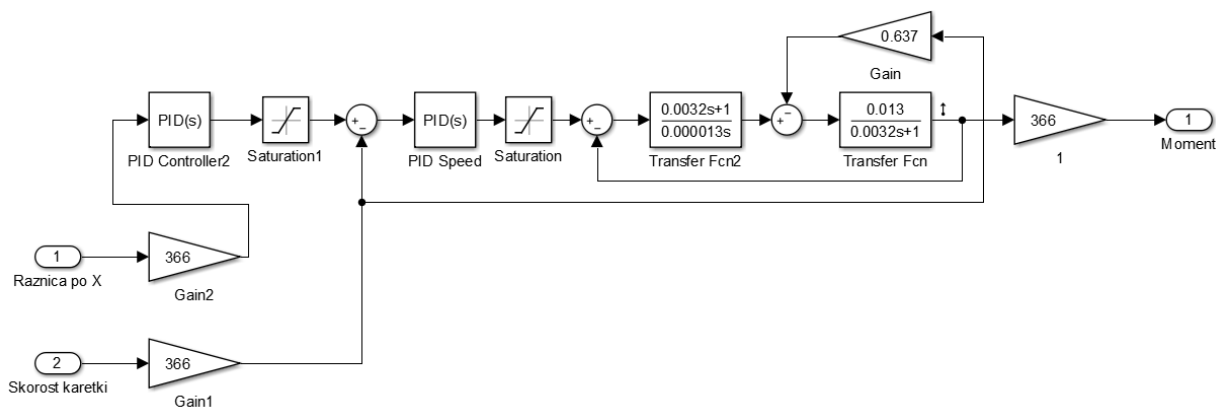


Рисунок 77 – Устройство подсистемы Privodnaja systema

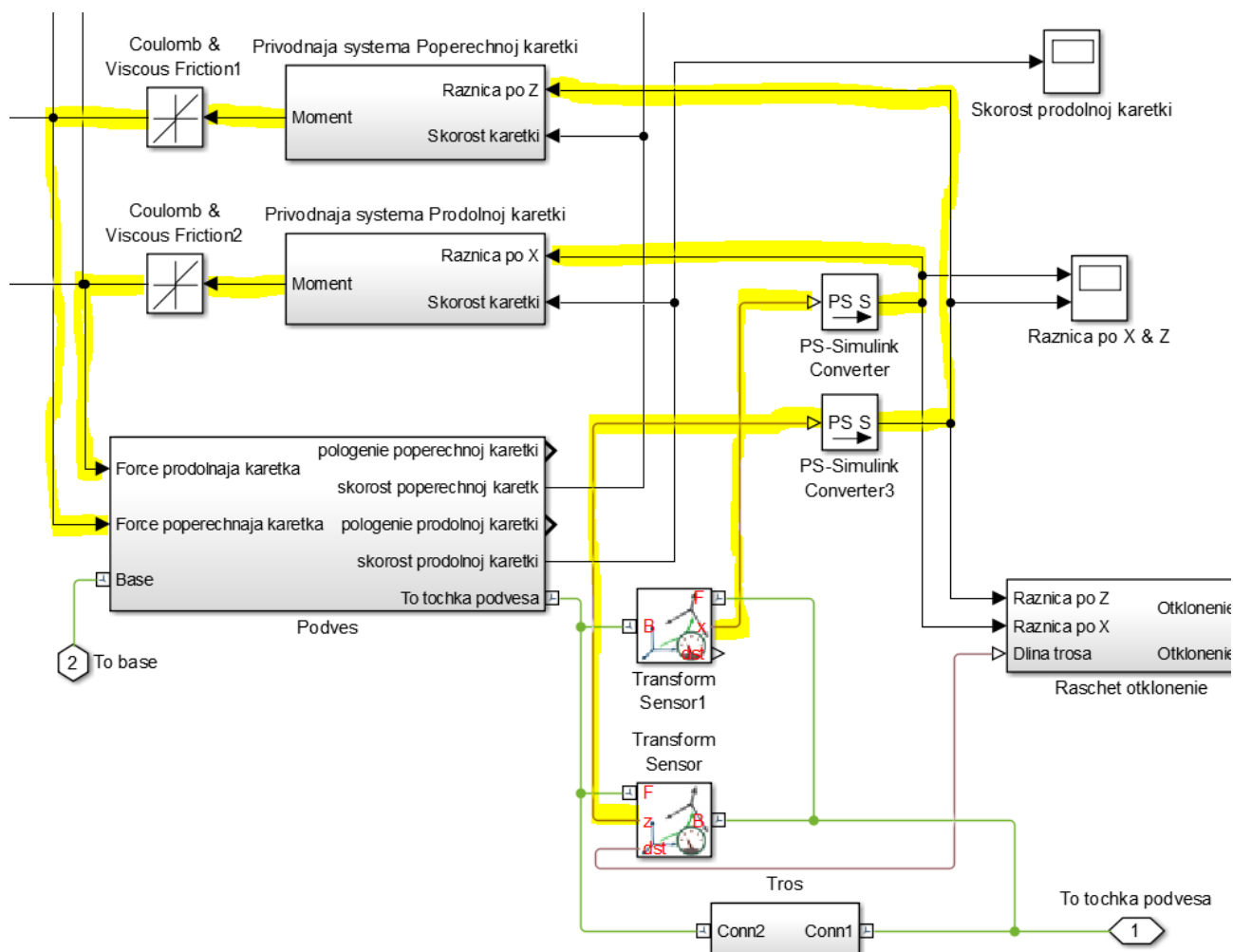


Рисунок 78 – Устройство следящей системы итоговой модели с выделенным путём следования информации о разнице между точками подвеса и вывески

#### 5.2.4 Внедрение модели троса

Для большей наглядности разницы по перемещению в пространстве в следящую систему была введена модель троса в виде подсистемы Tros (Рисунки 78 и 79).

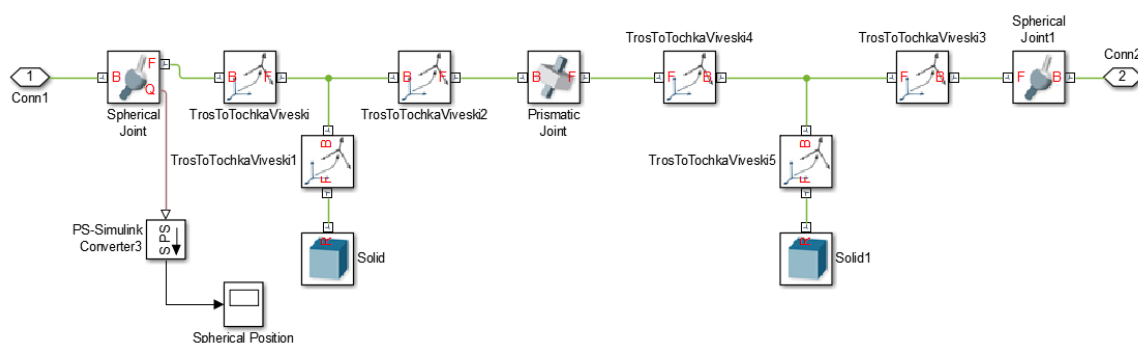


Рисунок 79 – Устройство подсистемы Tros



Подсистема Tros, как можно заметить из рисунка 78, включена параллельно между точкой подвеса на обезвешиваемой части КБС и точкой вывески на одной из кареток. С обоих концов троса поставлены сферические сочленения Spherical Joint, обеспечивающие три вращательные степени подвижности. Из рисунка 79 видно, что весь трос разделён на две части, которые связаны одним сочленением Prismatic Joint, обеспечивающим одну поступательную степень подвижности. Таким образом, обеспечивается симуляция растяжения троса по вертикали, при увеличении разницы в пространстве между точками подвеса и вывески (Рисунок 80).

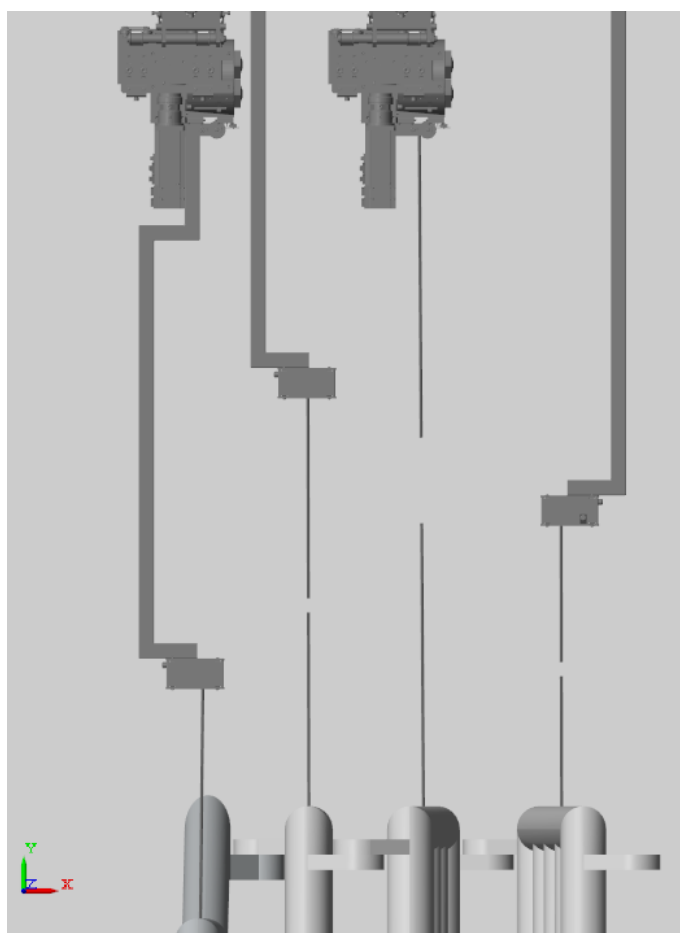


Рисунок 80 – Визуализация тросов каждой из кареток в начальный момент моделирования

На примере второго подвеса поясним устройство подсистемы Tros.

- Назначения сочленений, присутствующих в подсистеме Tros, были описаны выше.

- Блоки СК TrosToTochkaViveski и TrosToTochkaViveski2 отвечают за концевые точки нижней части троса (Рисунок 81).
- Блоки СК TrosToTochkaViveski3 и TrosToTochkaViveski4 отвечают за концевые точки верхней части троса (Рисунок 82).
- Блоки СК TrosToTochkaViveski1 и TrosToTochkaViveski5 являются центрами масс нижней и верхней частей троса, соответственно.
- Блоки тел Solid и Solid1 отвечают за визуализацию нижней и верхней частей троса, соответственно.

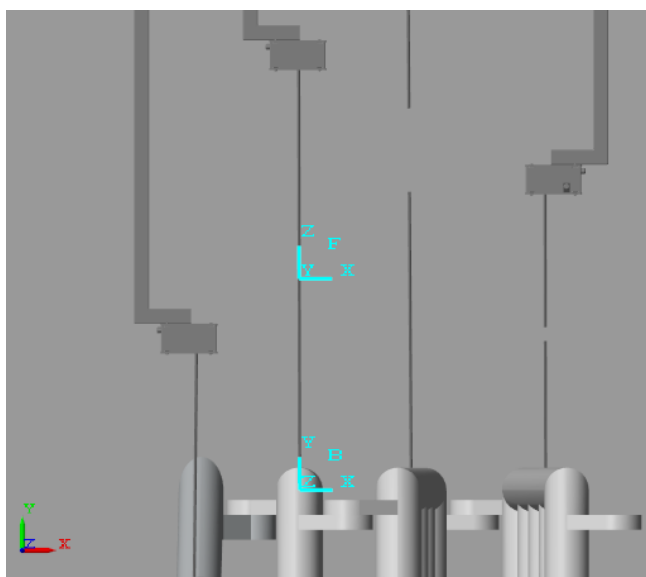


Рисунок 81 – Расположение концевых СК нижней части троса

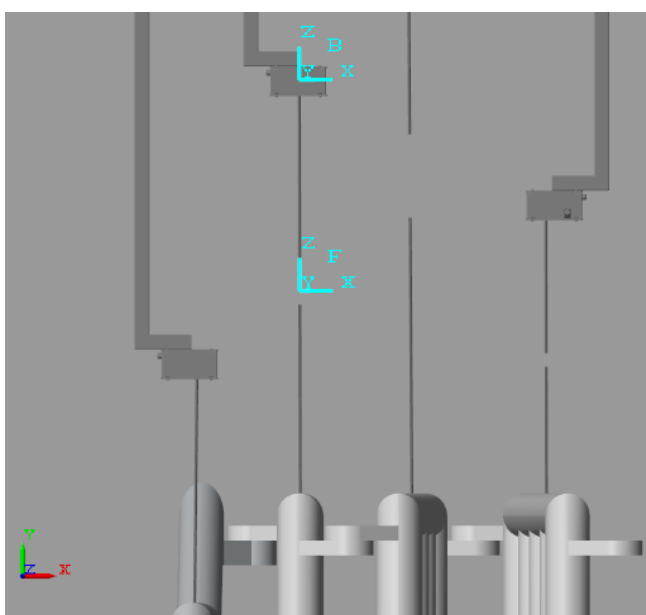


Рисунок 82 – Расположение концевых СК верхней части троса

Ориентация осей СК TrosToTochkaViveski2 и TrosToTochkaViveski4 подобраны таким образом, чтобы оси Z этих СК были сонаправленными. Этого требует блок сочленения Prismatic, так как поступательная степень свободы обеспечивается только вдоль оси Z базовой и последующей СК. Ориентации осей СК TrosToTochkaViveski и TrosToTochkaViveski3 не важны. Единственное ограничение, которое накладывает сферический блок сочленения то, что координаты базовой и последующей СК должны совпадать.

Каждый из подвесов имеет свою подсистему Tros. Структура каждой из них, идентична показанной на рисунке 79. Отличие составляют лишь длины частей тросов, внесённые в свойства блоков Тел Solid и Solid1.

### 5.2.5 Внедрение блока расчёта отклонения троса от вертикали

Подобный блок выражен подсистемой Raschet otklonenija, которая показана на рисунке 67.

Для того чтобы определить угол отклонения троса от вертикали по каждой из осей, необходимо взять арксинус от отношения разницы координат точек подвеса и вывески в рабочем пространстве по одной из осей движения кареток на проекцию величины удлинения троса, выражающуюся формулами для каждой из проекций:

$$PDistX = \sqrt{Dist^2 - Z^2}; \quad (1)$$

$$PDistZ = \sqrt{Dist^2 - X^2}. \quad (2)$$

На входы подсистемы Raschet otklonenija Z и X (Рисунок 67) подаются показания о разнице координат точек подвеса и вывески для продольной и поперечной кареток, соответственно.

На вход подсистемы Raschet otklonenija Dist (Рисунок 67) подаётся информация о дистанции между точками подвеса и вывески (что является полной длиной троса).

Рассмотрим устройство подсистемы Raschet otklonenija (Рисунок 83).

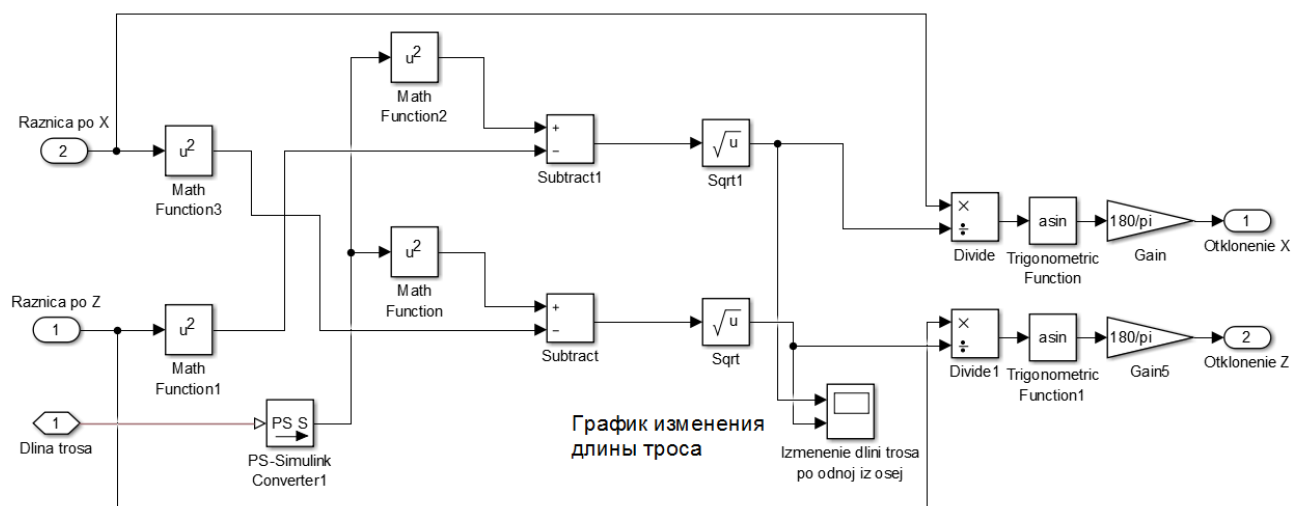


Рисунок 83 – Устройство подсистемы Raschet otklonenija

На рисунке 83 представлена формула расчёта угла, через арксинус отношения противолежащего катета к гипотенузе с переводом из радиан в градусы, в алгебраическом представлении формулы расчёта отклонения выглядят следующим образом:

$$\varphi_X = \arcsin\left(\frac{X}{PDistX}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = \arcsin\left(\frac{X}{\sqrt{Dist^2 - Z^2}}\right) \cdot \frac{180}{\pi}; \quad (3)$$

$$\varphi_Z = \arcsin\left(\frac{Z}{PDistZ}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = \arcsin\left(\frac{Z}{\sqrt{Dist^2 - X^2}}\right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (4)$$

### 5.2.6 Блок сухого и вязкого трения

Последним незатронутым блоком, входящим в состав системы Podves (Рисунок 67), является блок сухого и вязкого трения (Coulomb & Viscous Friction). Данный блок расположен на пути сигнала, передающего информацию о линейном усилии продольной и поперечной каретки, чем вносит дополнительную составляющую в управляющий сигнал. Свойства блока показаны на рисунке 84.

Данный блок представляет из себя следующую формулу:

$$y = \text{sign}(x) \cdot (C_{Vf} \cdot |x| + C_{Cf}), \quad (5)$$

где  $x$  – вход блока сухого и вязкого трения;  $y$  – выход блока;  $C_{Vf}$  – коэффициент вязкого трения;  $C_{Cf}$  – коэффициент трения Кулона или сухого трения.

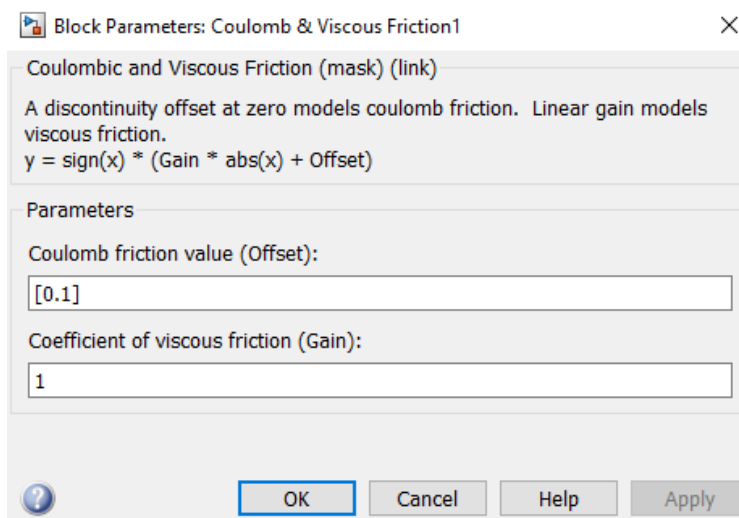


Рисунок 84 – Свойства блока сухого и вязкого трения

### 5.2.7 Результаты моделирования объединённой модели стенда обезвешивания

Покажем визуализацию процесса раскрытия КБС в составе объединённой модели стенда обезвешивания в транспортировочном (начальном) состоянии (Рисунок 85), в процессе раскрытия крыла (Рисунок 86) и в рабочем (конечном) состоянии (Рисунок 87).

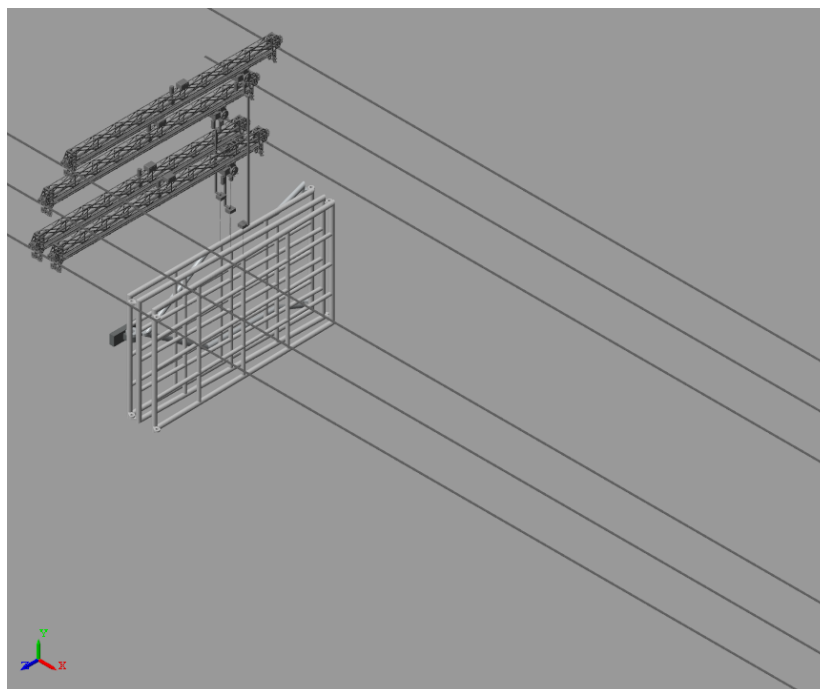


Рисунок 85 – КБС в составе объединённой модели стенда обезвешивания в транспортировочном (начальном) состоянии

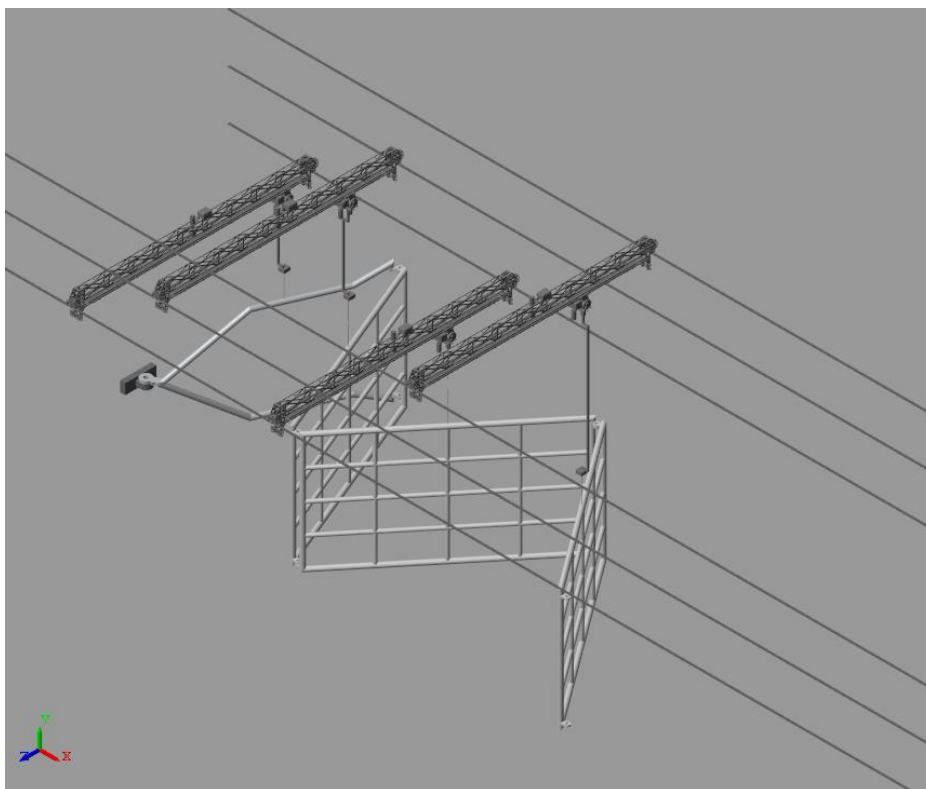


Рисунок 86 – КБС в составе объединённой модели стенда обезвешивания в процессе раскрытия

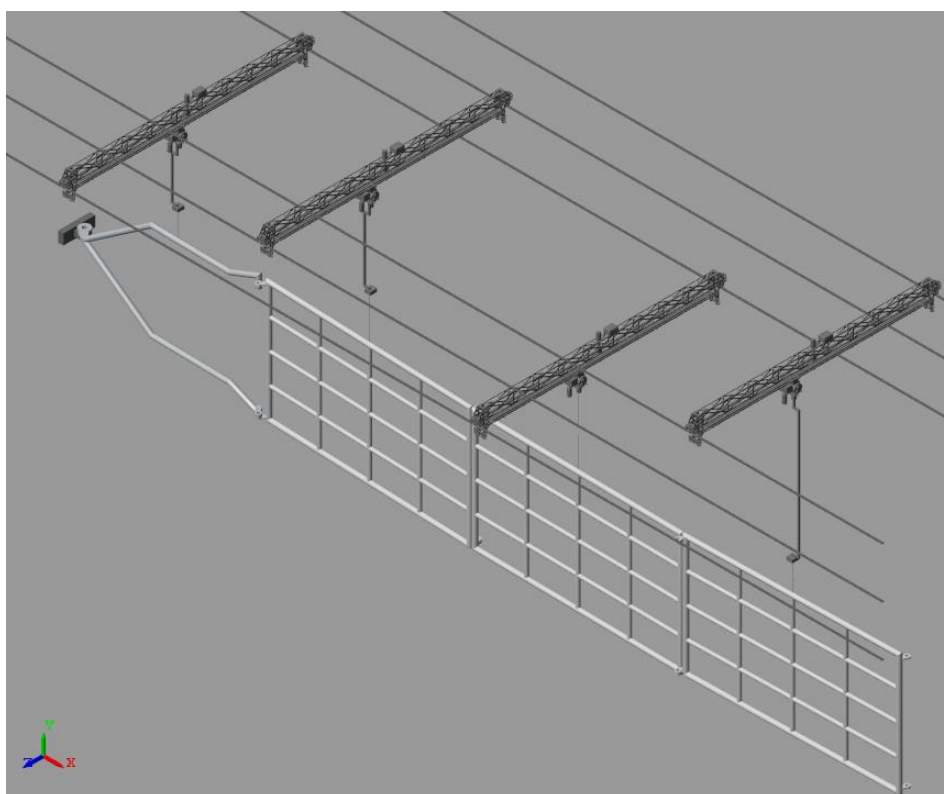


Рисунок 87 – КБС в составе объединённой модели стенда обезвешивания в рабочем (конечном) состоянии

Приведём графики отклонения от вертикали по осям движения продольной и поперечной каретки для каждого из подвесов (Рисунки 88-91).

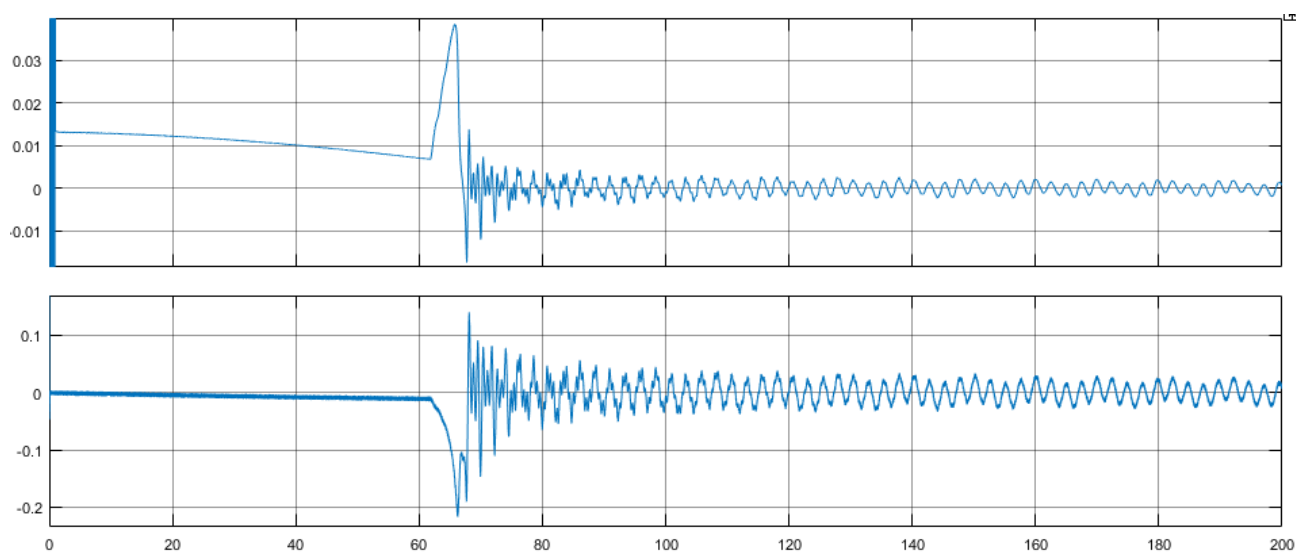


Рисунок 88 – График отклонения троса первого подвеса от вертикали (Верхний график по оси X продольной каретки, нижний график по оси Z поперечной каретки. По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат – отклонение троса от вертикали в угловых градусах)

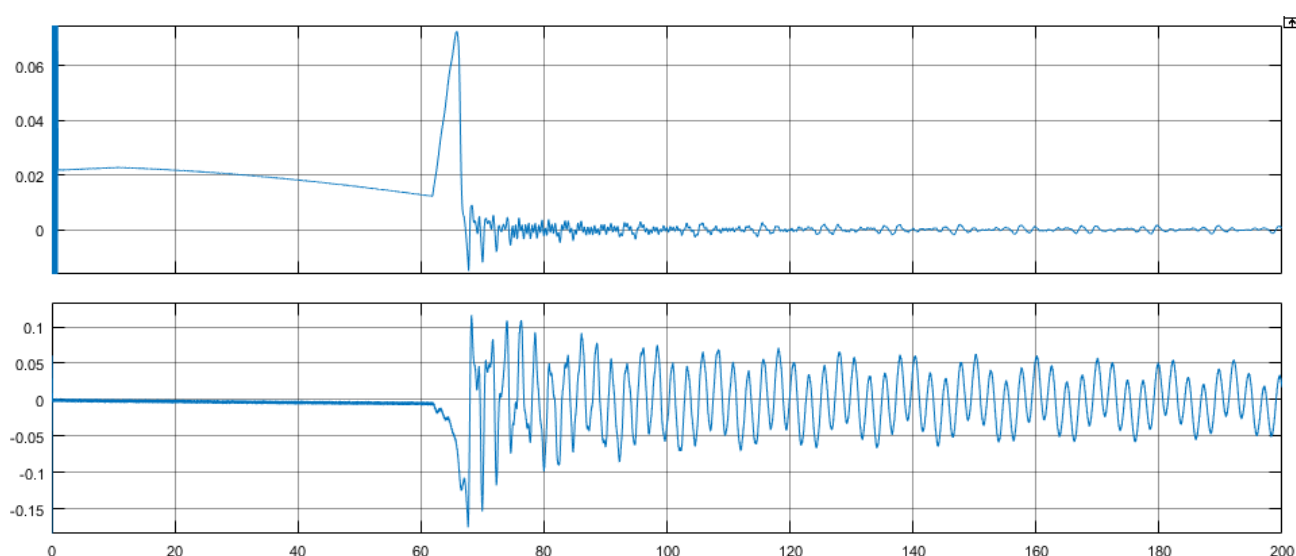


Рисунок 89 – График отклонения троса второго подвеса от вертикали (Верхний график по оси X продольной каретки, нижний график по оси Z поперечной каретки. По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат – отклонение троса от вертикали в угловых градусах)

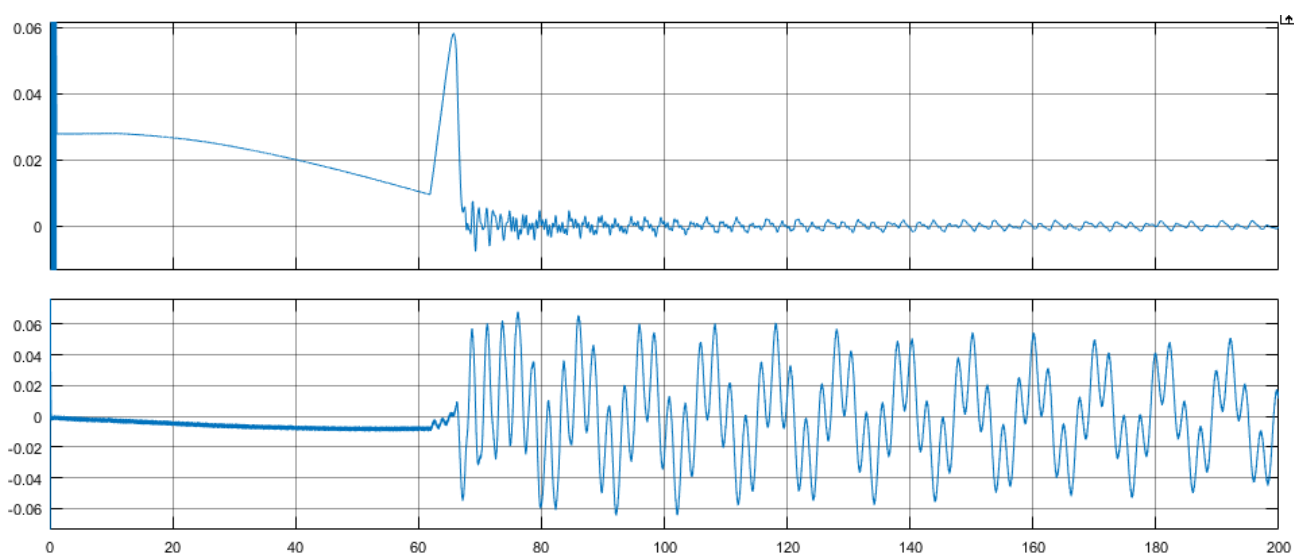


Рисунок 90 – График отклонения троса третьего подвеса от вертикали (Верхний график по оси X продольной каретки, нижний график по оси Z поперечной каретки. По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат – отклонение троса от вертикали в угловых градусах)

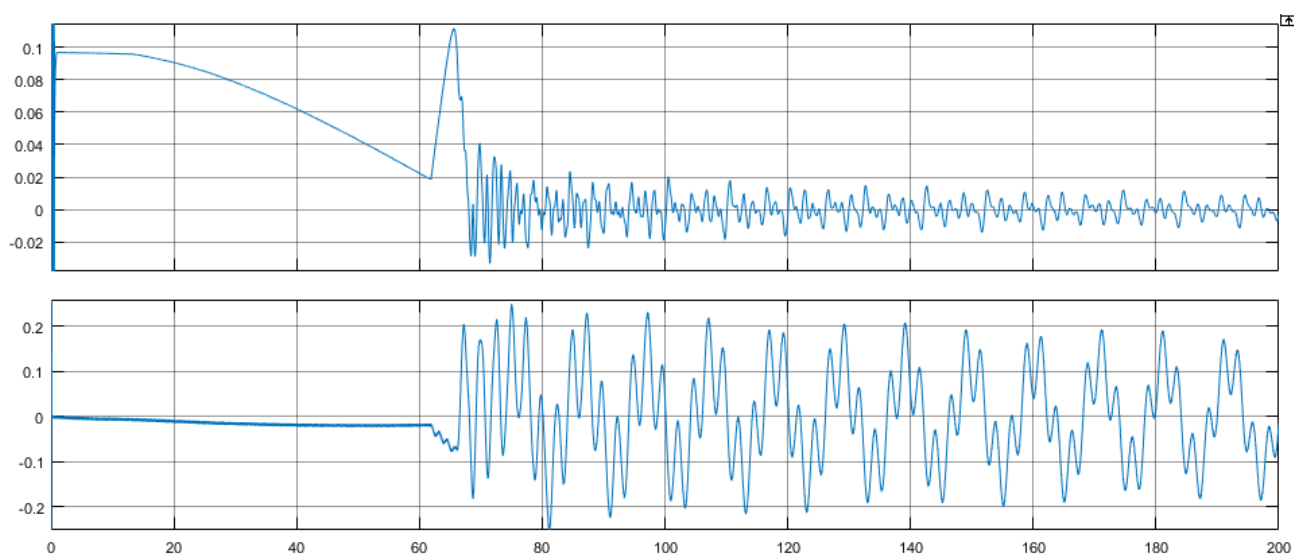


Рисунок 91 – График отклонения троса четвёртого подвеса от вертикали (Верхний график по оси X продольной каретки, нижний график по оси Z поперечной каретки. По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат – отклонение троса от вертикали в угловых градусах)

На каждом из графиков, приведённых выше, отчётливо прослеживается момент зачековки (шестьдесят пятая секунда), выражающийся пиком отклонения каждого из тросов по оси X продольной каретки. Далее происходит



колебательный затухающий процесс, вплоть до окончания моделирования, что является нормой для моделирования раскрытия КБС. Известно, что в своём рабочем состоянии в невесомости подобный затухающий процесс может продолжаться свыше двадцати четырёх часов. В момент от шестидесяти до шестидесяти пяти секунд можно увидеть незначительные отклонения от вертикали каждого из тросов по оси Z поперечной каретки, что отражает момент зачековки четвёртого шарнира, соединяющего промежуточную и концевую панели КБС.

Стоит отметить, что в начальный момент времени по оси X продольной каретки наблюдаются значительные отклонения от вертикали каждого из тросов. Данное отклонение было внесено намеренно, чтобы показать, как продольные каретки выходят из начального положения (Рисунок 92) на точку вывески.

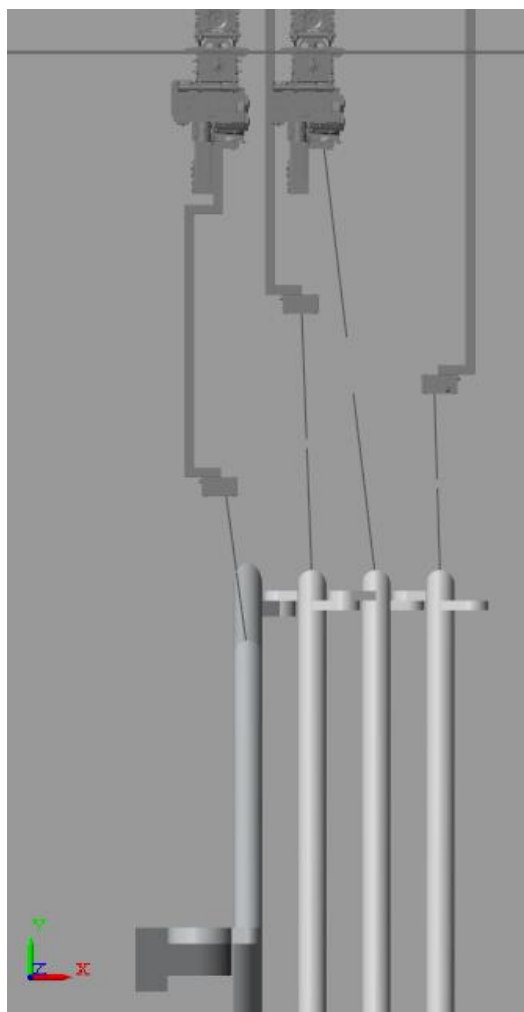


Рисунок 92 – Отклонение тросов в начальный момент времени

### 5.3 Расчёт энергетики стенда

На основе испытаний модели стенда необходимым критерием достоверности получаемых результатов, является достаточность энергетических характеристик силовых элементов, которые обеспечивают разворачивание конструкции. Особый интерес представляют максимальные силы и моменты, возникающие в конструкции, так как чрезмерные их значения могут быть причиной поломок элементов конструкции. Из этого следует важность оценки энергетики процессов, происходящих в разворачиваемой конструкции.

Оценку энергетики стенда будем производить при помощи встроенных функций Matlab/Simulink. Для начала определимся с расчётными формулами.

КСБ представляет голономную систему с  $n$  степенями свободы. Она состоит из звеньев, которые будем представлять твердыми телами с известными массово-инерционными параметрами, последовательно соединенных кинематическими парами пятого класса. Кинетическая энергия механической системы  $W$  равна сумме кинетических энергий  $W_i$  всех ее звеньев:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

На рисунке 93 представлена кинематическая схема КБС типа «Экспресс-2000» в процессе раскрытия в горизонтальной плоскости. В качестве обобщенных координат примем углы:  $\varphi_i, i = \overline{1, 4}$ .

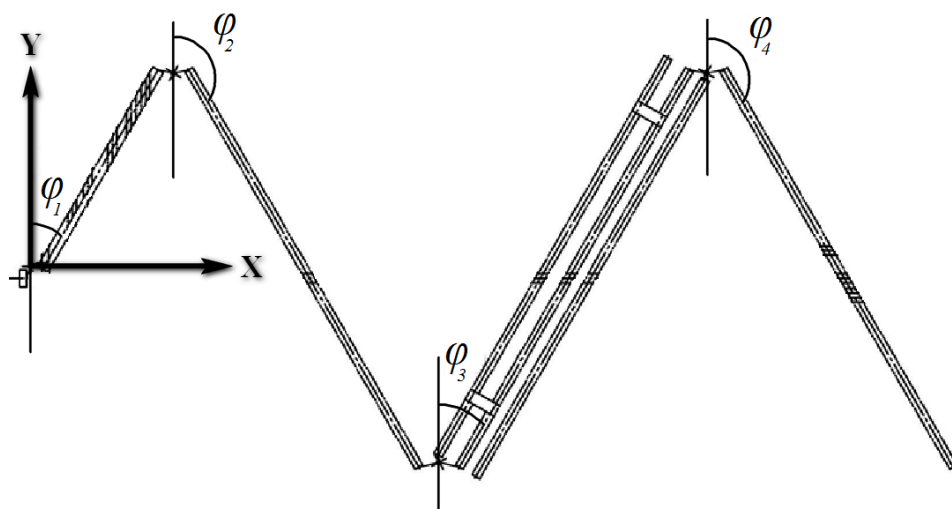


Рисунок 93 – Общий вид крыла солнечной батареи

Первое звено (штанга) совершает вращательное движение, остальные звенья рассматриваемой системы совершают плоскопараллельное движение. Кинетическая энергия тела  $W_i$  при плоскопараллельном движении равна сумме кинетических энергий вращательного и поступательного движений тела:

$$W_1 = J_1 \frac{\dot{\phi}_1(t)^2}{2}, \quad W_i = J_i \frac{\dot{\phi}_i(t)^2}{2} + m_i \frac{V_i(t)^2}{2}, \quad i = \overline{2,4}, \quad (7)$$

где  $J_1$  – момент инерции штанги относительно оси вращения,  $J_i$  – центральные моменты инерции,  $\dot{\phi}_i(t)$  – угловая скорость,  $m_i$  – масса,  $V_i(t)$  – линейная скорость центра масс  $i$ -ого тела.

Если принять, что звенья совершают только плоскопараллельные движения, их можно представить в виде стержней, имеющих моменты инерции:

$$J_1 = \frac{1}{3} m_1 l_1^2, \quad J_i = \frac{1}{12} m_i l_i^2, \quad i = \overline{2,4}. \quad (8)$$

Массогабаритные характеристики взяты в соответствии с исходными данными [2]. Информацию об угловой и линейных скоростях будем снимать непосредственно с самой модели КБС.

В составе модели расчётная формула будет выглядеть следующим образом (Рисунки 94 и 95):

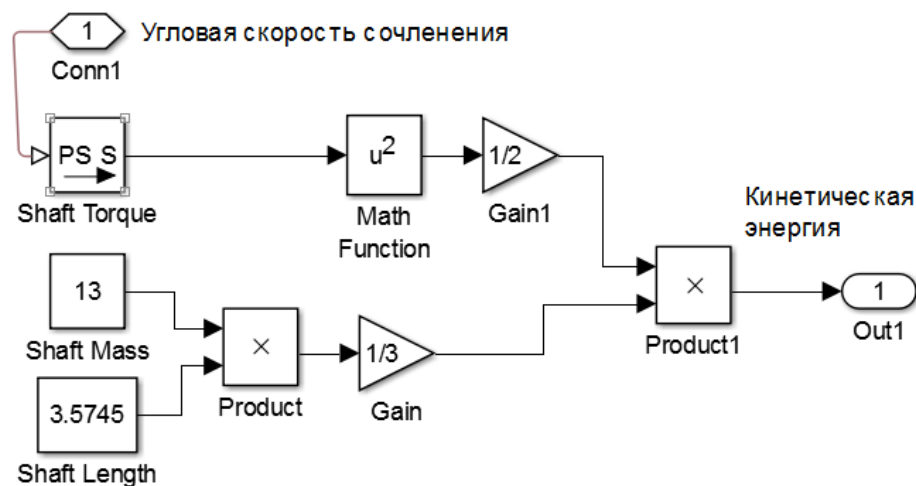


Рисунок 94 – Расчётная формула кинетической энергии штанги в Simulink

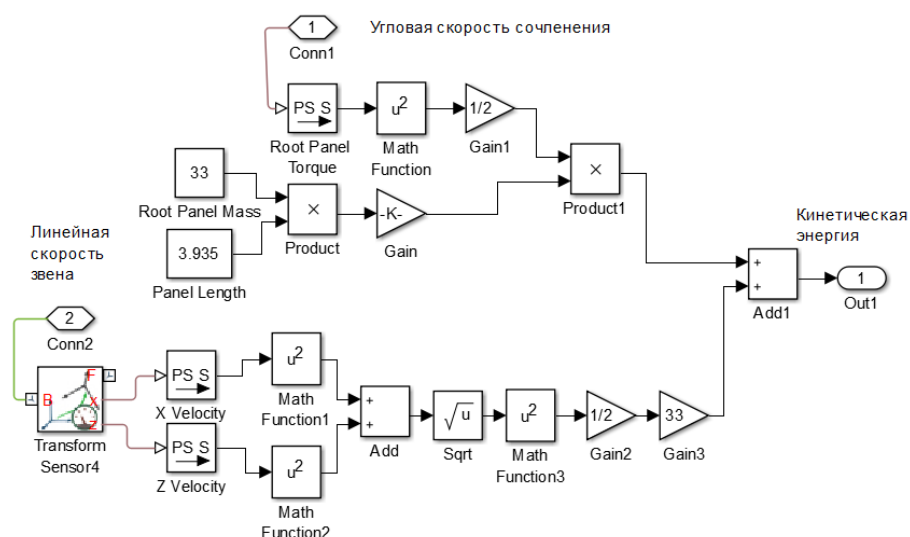


Рисунок 95 – Расчётная формула кинетической энергии корневой панели в Simulink

Сравним энергетики процессов раскрытия модели КБС в условиях невесомости (без стенда и аэродинамики) и в условиях наземных испытаний (со стендом и учтённой аэродинамикой крыла). Кроме того, приведём на графиках информацию о разнице энергий двух условий моделирования КБС (Рисунки 96-101).

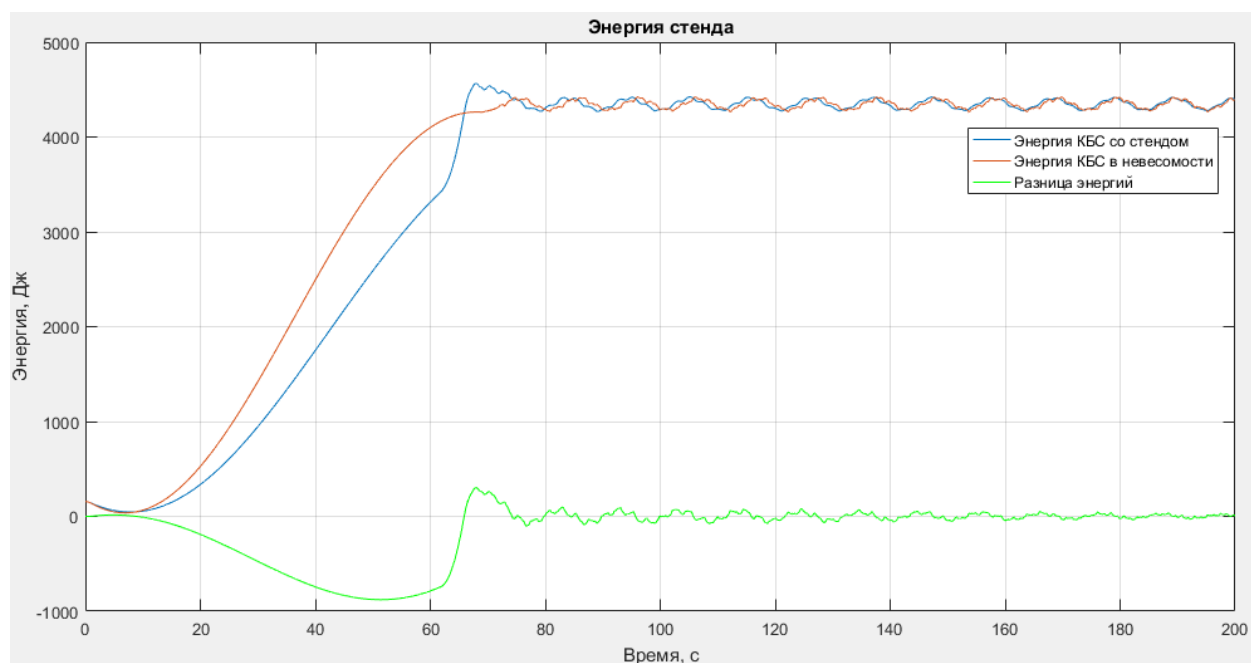


Рисунок 96 – Общая энергия КБС в условиях невесомости и при наземных испытаниях

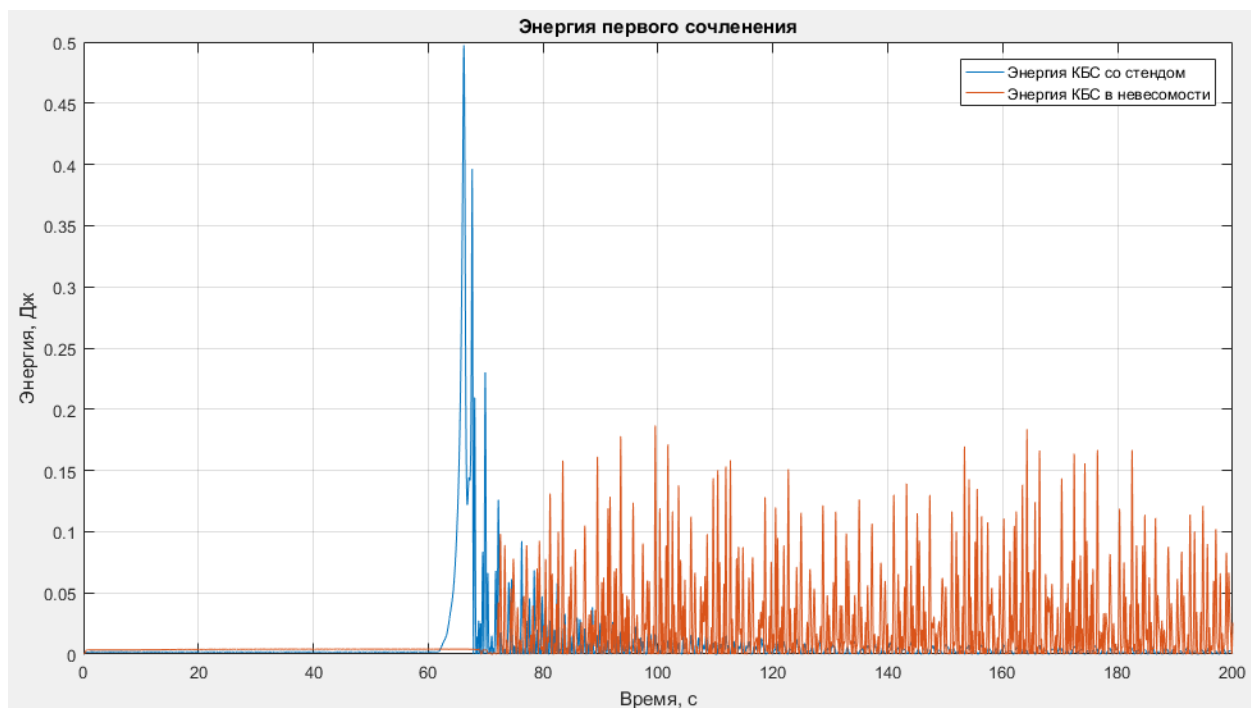


Рисунок 97 – Энергия первого сочленения в условиях невесомости и при наземных испытаниях

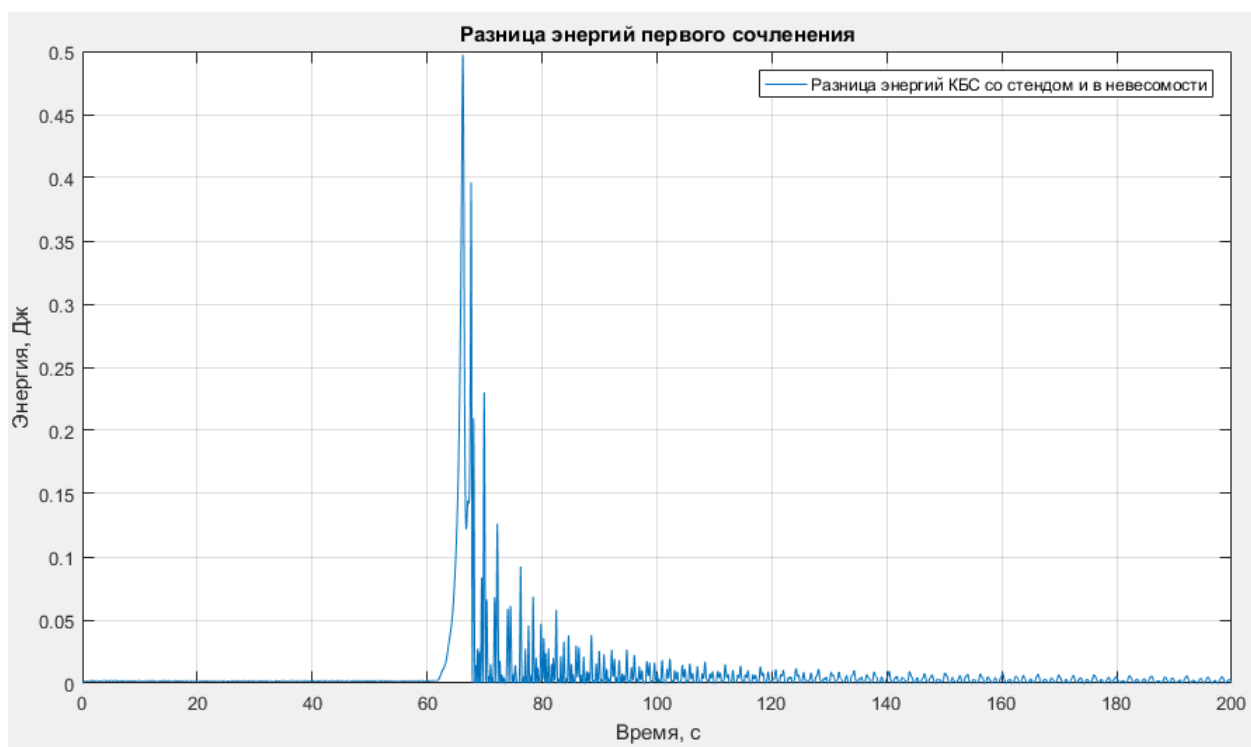


Рисунок 98 – Разница энергий первого сочленения

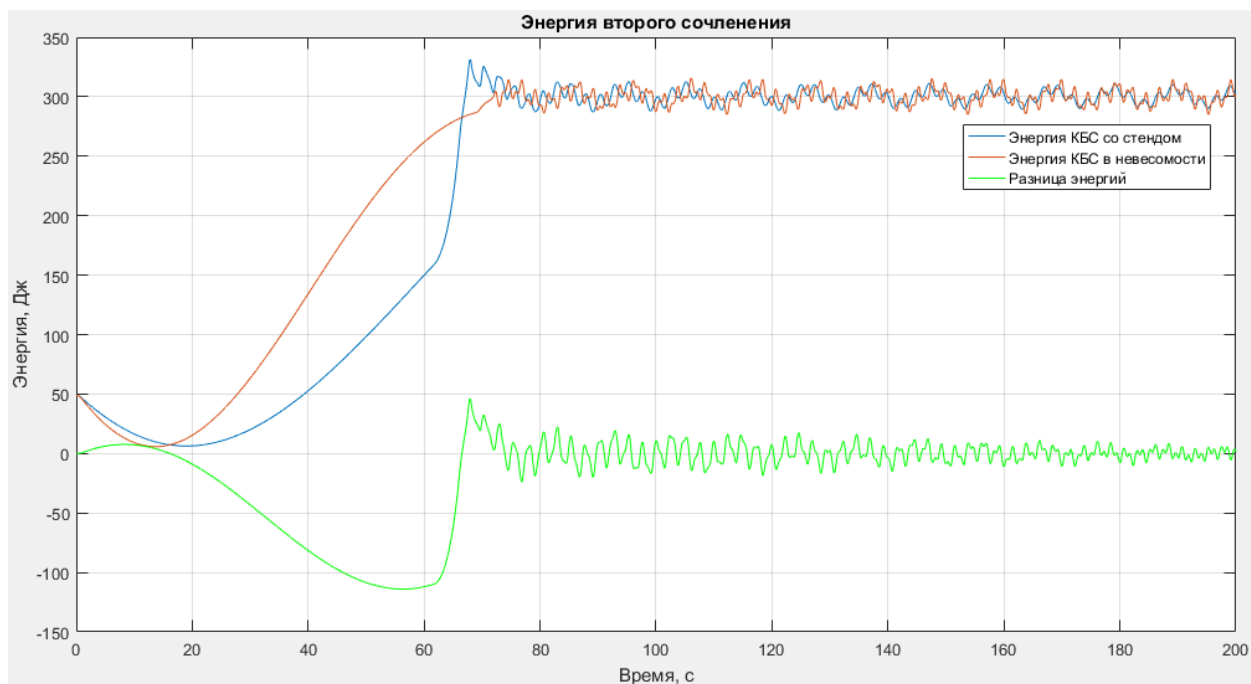


Рисунок 99 – Энергия второго сочленения в условиях невесомости и при наземных испытаниях

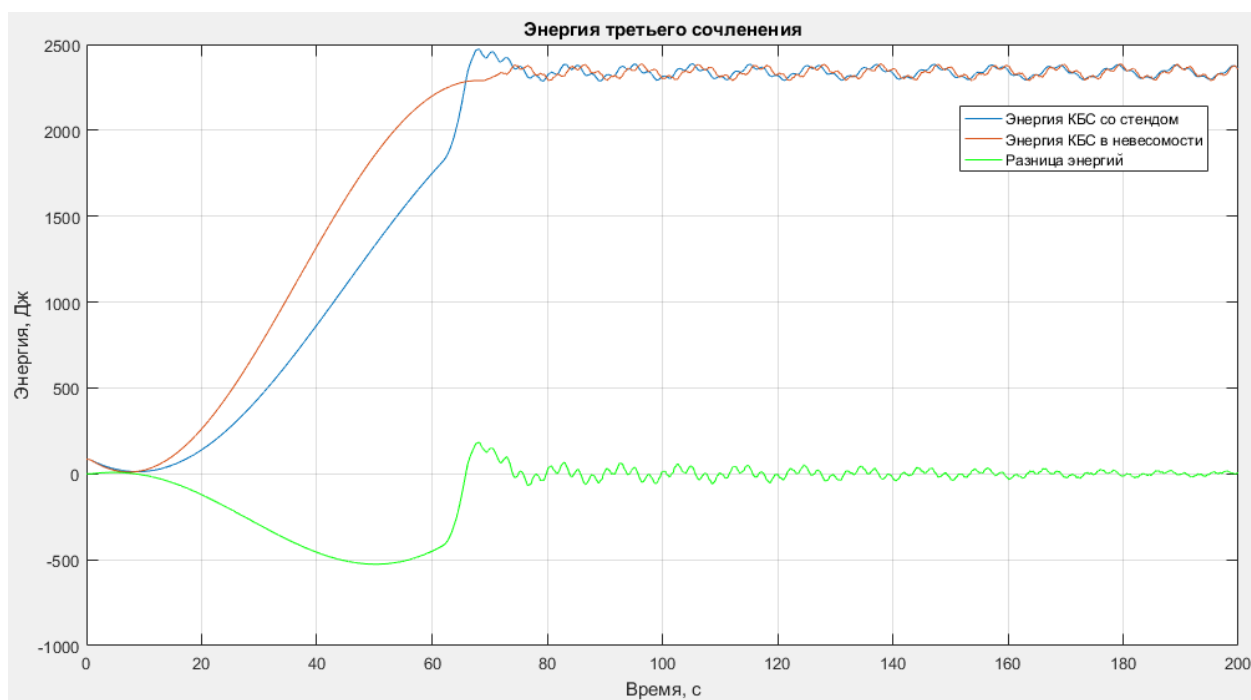


Рисунок 100 – Энергия третьего сочленения в условиях невесомости и при наземных испытаниях

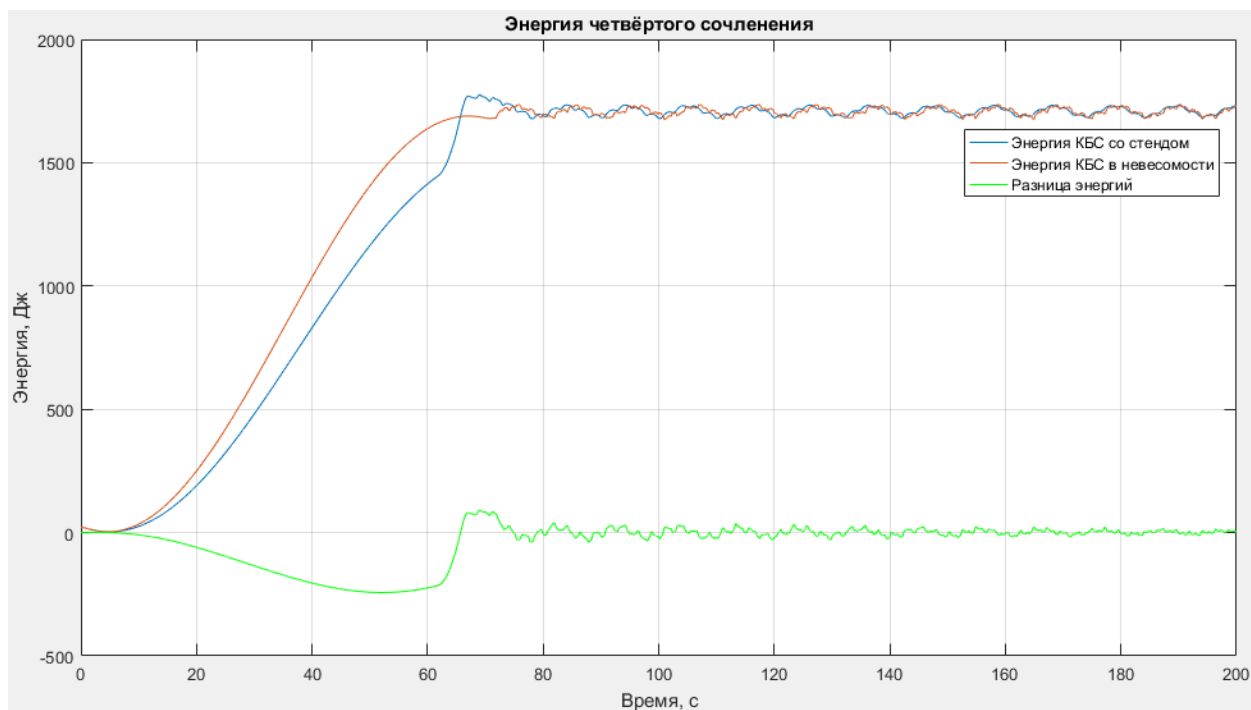


Рисунок 101 – Энергия четвёртого сочленения в условиях невесомости и при наземных испытаниях

Анализируя графики, приведённые выше можно сделать следующие выводы.

- На графиках, показывающих расчёты кинетической энергии звеньев панелей (Рисунки 99-101), до момента зачековки (65 секунда) наблюдаются различные потери энергии. Подобная разница связана с тем, что при моделировании раскрытия КБС в условиях наземного раскрытия учитываются аэродинамика крыла, а также влияние вертикального канала стенда обезвешивания, представляющим собой тросовый подвес. Система обезвешивания из-за задержек датчиков отклонения угла от вертикали реагирует не мгновенно, что влечёт за собой натяжение троса и влияние на процесс раскрытия КБС за счёт учтённой жёсткости троса.
- После зачековки наблюдаются незначительные потери энергии, которые по мере затухания колебательного процесса звеньев КБС нивелируются.

В соответствии с техническим заданием [1] нам необходимо знать интегральный коэффициент потери энергии. Полученное значение не должно

превышать 10% разницу от коэффициента, полученного в ходе испытаний реального стенда.

Для того чтобы его вычислить воспользуемся формулой:

$$\Delta E_K = \int_0^t |E_{K1} - E_{K2}|, \quad (9)$$

где  $\Delta E_K$  – интегральный коэффициент потери энергии;  $t$  – период моделирования (в нашем случае  $t=200$  с.);  $E_{K1}$  – кинетическая энергия модели КБС в условиях невесомости;  $E_{K2}$  – кинетическая энергия КБС в условиях наземных испытаний.

Воспользовавшись функционалом Matlab получим следующее значение:

$$\Delta E_K = 2,587 \times 10^4.$$

Полученный результат в дальнейшем можно будет использовать для определения адекватности полученных результатов моделирования системы обезвешивания КБС.



## 6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 6.1 Организация и планирование работ

Составим перечень проводимых работ, а также определим их исполнителей и рациональную продолжительность (Таблица 3).

Таблица 3 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 20%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 40% И – 100%
Выбор структурной схемы модели стенда	НР, И	НР – 100% ИП – 70%
Выбор принципиальной схемы модели стенда	НР, И	НР – 60% И – 100%
Создание модели стенда	НР, И	НР – 10% И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

Для определения вероятных (ожидаемых) значений продолжительности работ  $t_{ож}$  воспользуемся формулой (10):

$$t_{ож} = \frac{t_{min} + 4 \cdot t_{prob} + t_{max}}{6}, \quad (10)$$

где  $t_{min}$  – минимальная продолжительность работы, дн.;

$t_{max}$  – максимальная продолжительность работы, дн.;

$t_{prob}$  – наиболее вероятная продолжительность работы, дн.

Затем рассчитаем продолжительность выполнения каждого этапа в рабочих днях (ТРД) по формуле (11):

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}, \quad (11)$$

где  $t_{ож}$  – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно  $K_{ВН} = 1$ ;

$K_{Д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ( $K_{Д}$  примем равное 1,2).

После рассчитаем продолжительность этапа в календарных днях по формуле (12):

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}, \quad (12)$$

где  $T_{КД}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{К}$  – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле (13):

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (13)$$

где  $T_{КАЛ}$  – календарные дни ( $T_{КАЛ} = 365$ );

$T_{ВД}$  – выходные дни ( $T_{ВД} = 52$ );

$T_{ПД}$  – праздничные дни ( $T_{ПД} = 10$ ).

$$T_{К} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205.$$

Полученные результаты объединим в таблицу трудозатрат на выполнение проекта (Приложение Д).

Теперь рассчитаем показатель накопления готовности проекта. Для начала введём необходимы обозначения:

- $ТР_{общ}$  – общая трудоемкость проекта;
- $ТР_i$  ( $ТР_k$ ) – трудоемкость  $i$ -го ( $k$ -го) этапа проекта,  $i = \overline{1, I}$ ;

- $TP_i^H$  – накопленная трудоемкость  $i$ -го этапа проекта по его завершении;
- $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) – трудоемкость работ, выполняемых  $j$ -м участником на  $i$ -м этапе, здесь  $i = 1, m$  – индекс исполнителя, в нашем примере  $m = 2$ .

Степень готовности определяется формулой (14):

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{общ}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{общ}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}}. \quad (14)$$

Применительно к таблице 4 величины  $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) находятся в столбцах (6,  $j = 1$ ) и (7,  $j = 2$ ).  $TP_{общ}$  равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Рассчитаем  $TP_i$  (%) и  $CG_i$  (%) на основе этих данных содержится в таблице 4. Таблица 4 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	$TP_i$ , %	$CG_i$ , %
Постановка целей и задач, получение исходных данных	2.99	2.99
Составление и утверждение ТЗ	2.82	5.81
Подбор и изучение материалов по тематике	10,11	15,92
Разработка календарного плана	3.28	19,20
Обсуждение литературы	5.83	25,03
Выбор структурной схемы модели стенда	20,89	45,92
Выбор принципиальной схемы модели стенда	5,41	51,33
Создание модели стенда	24,62	75.96
Оформление расчетно-пояснительной записки	7.69	83.65
Оформление графического материала	5.77	89.41
Подведение итогов	10.59	100.00

## 6.2 Расчёт сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;

- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

### 6.2.1 Расчёт затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно.

В данном проекте модель создавалась в программной среде, за исключением создания заказчику двух крупных томов отчёта в твёрдом переплёте. Исходя из этого рассчитаем затраты на материалы (Таблица 5):

Таблица 5 – Расчёт затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	160	1 уп.	160
Картридж для принтера	1700	1 шт.	1700
Печать и вёрстка тома отчёта	450	2 экз.	900
<b>Итого:</b>			<b>2760</b>

Транспортно-заготовительные расходы в нашем случае будут составлять 15% от отпускной цены материалов, так как отчёты необходимо было доставить в другой город. Тогда расходы на материалы с учетом транспортно-заготовительных расходов равны  $C_{\text{мат}} = 2760 \cdot 1,15 = 3174$  руб.

### 6.2.2 Расчёт заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и исполнителя проекта, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Рассчитаем основную заработную плату на основе

трудоемкости выполнения каждого этапа (Приложение Д) и величины месячного оклада исполнителя (Таблица 6). Оклад исполнителя примем равным окладу ассистента кафедры без степени. Оклад научного руководителя примем равным окладу доцента кафедры со степенью к.т.н.

Далее рассчитаем среднедневную тарифную заработную плату для каждого из исполнителей:

$$ЗП_{\text{дн-м}} = MO / 24,83, \quad (15)$$

где МО – месячный оклад; 24,83 – количество в среднем рабочих дней (в шестидневной рабочей неделе).

$$ЗП_{\text{дн-м}}(НР) = 26300 / 24,83 = 1059.2,$$

$$ЗП_{\text{дн-м}}(И) = 17000 / 24,83 = 684.66.$$

Интегральный коэффициент для каждого из исполнителей будет составлять  $K_{\text{И}} = K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{доп.ЗП}} \cdot K_{\text{Р}} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699$ .

Таблица 6 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	26 300	1059,2	39	1,699	70 183,65
И	17 000	684,66	148	1,699	172 159,13
Итого:					242342,78

### 6.2.3 Расчёт затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30% от полной заработной платы по проекту, т.е.  $C_{\text{соц}} = C_{\text{ЗП}} \cdot 0,3$ . Таким образом, в нашем случае  $C_{\text{соц}} = 242342,78 \cdot 0,3 = 72702,8$  руб.

### 6.2.4 Расчёт затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{эл.об} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot Ц_{э}, \quad (16)$$

где  $P_{об}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{э}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{об}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $Ц_{э} = 5,782$  руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы трудозатраты на выполнение проекта (Приложение Д) для инженера ( $T_{рд}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{об} = T_{рд} \cdot K_t, \quad (17)$$

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{рд}$ .

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном} \cdot K_c, \quad (18)$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_c \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности  $K_c = 1$ . В нашем случае возьмём коэффициент равный 0,8.

Расчёты затрат на электроэнергию приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$ , час	Потребляемая мощность $P_{об}$ , кВт	Затраты $Э_{об}$ , руб.
Персональный компьютер	1184·0,6	0,3·0,8	902,55
Струйный принтер	20	0,1	11,56
<b>Итого:</b>			<b>914,11</b>

### 6.2.5 Расчёт амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта. Для этого используется формула:

$$C_{AM} = \frac{H_A \cdot Ц_{ОБ} \cdot t_{рф} \cdot n}{F_D}, \quad (19)$$

где  $H_A$  – годовая норма амортизации единицы оборудования. Срок амортизации (СА) примем равный 2,5 года для ПК, тогда  $H_A = 1/СА = 1/2,5 = 0,4$ , а для принтера примем СА равным 2 годам, тогда  $H_A = 1/СА = 1/2 = 0,5$ ;

$Ц_{ОБ}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. Для ПК примем равную 35000 руб., для принтера – 7000 руб.;

$F_D$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку САМ. Примем  $F_D$  для 298 рабочих дней при шестидневной рабочей неделе, тогда  $F_D = 298 \cdot 8 = 2384$  часа (для ПК), а для принтера примем  $F_D$  равным 500;

$t_{рф}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

$n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

В результате получим следующее:

$$C_{AM}(ПК) = \frac{H_A \cdot Ц_{ОБ} \cdot t_{рф} \cdot n}{F_D} = \frac{0,4 \cdot 35000 \cdot 1084 \cdot 1}{2384} = 6365,77,$$
$$C_{AM}(Принтер) = \frac{H_A \cdot Ц_{ОБ} \cdot t_{рф} \cdot n}{F_D} = \frac{0,5 \cdot 7000 \cdot 20 \cdot 1}{500} = 140.$$

### 6.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов

Сюда относятся:

- командировочные расходы, в т.ч. расходы по оплате суточных, транспортные расходы, компенсация стоимости жилья;
- арендная плата за пользование имуществом;
- оплата услуг связи;
- услуги сторонних организаций.

В ходе работы над этим проектом была произведена одна командировочная поездка. Время пребывания в командировке составило 4 календарных дня (с учетом дней приезда и отъезда); оплата проживания в профилактории 2200 руб./сутки · 3 суток = 6600 руб. (основные расходы за счет принимающей стороны); оплата перелёта в обе стороны – 4170 руб. Итого по данному пункту  $C_{\text{пр}} = (4-1) \cdot 100 + 6600 + 4170 = 11\,170$  руб.

### 6.2.7 Расчёт прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{\text{проч}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зн}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{пр}}) \cdot 0,1 =$$

$$= (3174 + 242342,78 + 72702,8 + 914,11 + 6505,77 + 11170) \cdot 0,1 = 33680,95.$$

### 6.2.8 Расчёт общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Разработка и исследование компонентной модели стенда обезвешивания крыльев батарей солнечных при наземных испытаниях приводов их раскрытия».

Таблица 8 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	3174
Основная заработная плата	$C_{\text{зн}}$	242342,78
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	72702,8
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	914,11
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	6505,77
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{пр}}$	11170
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	33680,95
Итого:		370490,41

Таким образом, затраты на разработку составили  $C = 370490,41$  руб.



### **6.2.9 Расчёт прибыли**

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации (масштаб и характер получаемого результата, степень его определенности и коммерциализации, специфика целевого сегмента рынка и т.д.) может определяться различными способами. Если исполнитель работы не располагает данными для применения «сложных» методов, то прибыль следует принять в размере 5 – 20 % от полной себестоимости проекта. В нашем случае она составляет 74098,08 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

### **6.2.10 Расчёт НДС**

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это  $(370490,41 + 74098,08) \cdot 0,18 = 80025,93$

### **6.2.11 Цена разработки НИР**

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае:

$$C_{\text{НИР}}(КР) = 370490,41 + 74098,08 + 80025,93 = 524614,42 \text{ руб.}$$

## **6.3 Оценка экономической эффективности проекта**

### **6.3.1 Определение срока окупаемости**

В связи с тем, что создаваемая разработка является заказным проектом от Роскосмоса, в рамках данной работы его стоимостная оценка недоступна. Дадим характеристику всех аспектов получаемого эффекта от создаваемой модели стенда.

Созданная программная модель несёт в себе внушительную материальную выгоду по следующим причинам:

- Сокращение длительности цикла испытаний проверяемой механической системы, так как большая часть испытаний перенесётся на созданный виртуальный стенд

- Сокращение затрат, в связи с сокращением количества натурных испытаний, что значительно уменьшает количество человеко-часов, затраченных на отработку реального стенда
- Сокращение транспортировочных и затрат на содержание, так как имитацию условий, создаваемых специализированным оборудованием (баракамера, чистая комната, цех с повышенной звукоизоляцией), находящимся в разных цехах, можно проводить при помощи созданной модели
- Снижение рисков аварийных ситуаций, что в случае реального стенда, может повлечь серьёзные расходы на восстановление поломки, либо же материальный ущерб пострадавшим сотрудникам
- В случае создание новой модели созданный программный вариант может обновляться параллельно с расчётами и конструированием реального стенда, так как на этапе разработки, в любом случае, конструкторами будет создаваться 3D-модель, которую использует созданный программный стенд

### **6.3.2 Оценка научно-технического уровня НИР**

Научно-технический уровень характеризует влияние проекта на уровень и динамику обеспечения научно-технического прогресса в данной области. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, используется метод балльных оценок. Балльная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям. На ее основе делается вывод о целесообразности НИР.

Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется интегральный показатель (индекс) ее научно-технического уровня по формуле:

$$I_{HTV} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i, \quad (20)$$

где  $I_{НТУ}$  – интегральный индекс научно-технического уровня;

$R_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го признака научно-технического эффекта;

$n_i$  – количественная оценка  $i$ -го признака научно-технического эффекта, в баллах.

Таблица 9 – Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признаки научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИР	$R_i$
Уровень новизны	Систематизируются и обобщаются сведения, определяются пути дальнейших исследований	0,3
Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, вещество и т.п.)	0,3
Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	0,4

Таблица 10 – Баллы для оценки уровня новизны

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны – $n_1$	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, вещество, способ	8 – 10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	5 – 7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2 – 4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 11 – Баллы значимости теоретических уровней

Теоретический уровень полученных результатов – $n_2$	Баллы
Установка закона, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2
Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Таблица 12 – Возможность реализации результатов по времени

Время реализации – $n_3$	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Так как все частные признаки научно-технического уровня оцениваются по 10-балльной шкале, а сумма весов  $R_i$  равна единице, то величина интегрального показателя также принадлежит интервалу  $[0, 10]$ .

В таблице 13 указано соответствие качественных уровней НИР значениям показателя, рассчитываемого по формуле (19).

Таблица 13 – Соответствие качественных уровней НИР значениям показателя

Уровень НТЭ	Показатель НТЭ
Низкий	1-4
Средний	4-7
Высокий	8-10

Дадим оценки уровня ( $n_i$ ) и их краткое обоснование (Таблица 14).

Таблица 14 – Оценки научно-технического уровня НИР

Значимость	Фактор НТУ	Уровень фактора	Выбранный балл	Обоснование выбранного балла
0,3	Уровень новизны	Относительно новая	7	Облегчит отработку механических систем космического аппарата
0,3	Теоретический уровень	Создание и исследование модели	5	Создание модели стенда обезвешивания основываясь на опыте создания реальных стендов
0,4	Возможность реализации	Ближайшие годы	9	Использование, как вспомогательное оборудование, на предприятии, конструирующее космические аппараты

Отсюда интегральный показатель научно-технического уровня для нашего проекта составляет:

$$I_{НТУ} = 0,3 \cdot 7 + 0,3 \cdot 5 + 0,4 \cdot 9 = 2,1 + 1,5 + 3,6 = 7,2.$$

Таким образом, исходя из данных таблицы 15, данный проект имеет высокий уровень научно-технического эффекта.

## 7 Социальная ответственность

Целью данной научно-исследовательской работы является создание математической модели универсального стенда для высокоточной имитации условий невесомости при комплексных проверках функционирования крупногабаритных трансформируемых конструкций (крылья солнечных батарей, рефлекторы антенн) космических аппаратов. Модель создаётся при помощи пакета прикладных программ Matlab.

Создаваемая математическая модель должна отвечать следующим требованиям:

- Учитывать факторы, влияющие на раскрытие крыльев солнечных батарей (аэродинамика больших площадей панелей солнечных батарей при раскрытии, трение в подвижных элементах шарнирных устройствах батарей солнечных и каретках автоматической системы обезвешивания, жесткость трособлочной вывески, временные задержки в передаче сигналов и т.д.).
- Иметь возможность корректироваться и дополняться в процессе разработки, ввода в эксплуатацию и эксплуатации автоматической системы обезвешивания заказчиком.
- Обеспечивать наглядную визуализацию процесса раскрытия выбранного изделия в составе автоматической системы обезвешивания.

### 7.1 Производственная безопасность

Приведём перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды в виде таблицы 15.

Таблица 15 – Опасные и вредные факторы при разработке и эксплуатации модели стенда обезвешивания

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Разработка и эксплуатация модели:	1. уровень шума на рабочем месте; 2. микроклимат;	1. Электрический ток (Источником является ПК.).	СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и

## Продолжение таблицы 17

1) разработка модели в учебной аудитории; 2) эксплуатация модели в учебной аудитории; 3) эксплуатация модели на предприятии.	3. уровень электромагнитных излучений; 4. напряжённость электрического поля; 5. отсутствие или недостаток естественного света; 6. освещённость рабочей зоны.	стенды, расположенные в аудитории).	на территории застройки [16]. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [14]. СанПиН 2.1.8/2.2.4.2490-09. Электромагнитные поля в производственных условиях [17]. СП 52.13330.2011 Свод правил. Естественное и искусственное освещение [15]. СанПиН 2.2.1/2.1.1.2585-10. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий [18]. ГОСТ Р 12.1.019-2009 (изм. №1) ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [19].
--	---	-------------------------------------	--

## 7.2 Микроклимат

Микроклимат производственных помещений, в основном, влияет на тепловое состояние организма человека и его теплообмен с окружающей средой.

Несмотря на то, что параметры микроклимата производственных помещений могут значительно колебаться, температура тела человека остается постоянной (36,6 °С). Свойство человеческого организма поддерживать тепловой баланс называется терморегуляцией. Нормальное протекание физиологических процессов в организме возможно лишь тогда, когда выделяемое организмом тепло непрерывно отводится в окружающую среду.

Отдача теплоты организмом человека во внешнюю среду происходит тремя основными способами (путями): конвекцией, излучением и испарением.

Снижение температуры при всех других одинаковых условиях приводит к росту теплоотдачи путем конвекции и излучения и может привести к переохлаждению организма.

При высокой температуре практически все тепло, которое выделяется, отдается в окружающую среду испарением пота. Если микроклимат характеризуется не только высокой температурой, но и значительной влажностью воздуха, то пот не испаряется, а стекает каплями с поверхности кожи.

Недостаточная влажность приводит к интенсивному испарению влаги со слизистых оболочек, их пересыханию и эрозии, загрязнению болезнетворными микробами. Вода и соли, выделяемые из организма потом, должны замещаться, поскольку их потеря приводит к сгущению крови и нарушению деятельности сердечно-сосудистой системы.

Повышение скорости движения воздуха способствует усилению процесса теплоотдачи конвекцией и испарением пота. Длительное влияние высокой температуры в сочетании со значительной влажностью может привести к накоплению тепла в организме и к гипертермии состоянию, при котором температура тела повышается до 38...40 °С.

При низкой температуре, значительной скорости и влажности воздуха возникает переохлаждение организма (гипотермия). Вследствие воздействия низких температур могут возникнуть холодовые травмы. Параметры микроклимата оказывают также существенное влияние на производительность труда и на травматизм.

По степени физической тяжести работа инженера-программиста относится к категории лёгких работ (Категория 1а). В соответствии со временем года и категорией тяжести работ определены допустимые и оптимальные параметры микроклимата согласно требованиям [14], которые приведены в таблицах 16 и 17 соответственно.

Таблица 16 – Допустимые параметры микроклимата рабочего места

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более**
Холодный	Категория 1а	20,0-21,9	24,1-25,0	19,0-26,0	15-75*	0,1	
Теплый	Категория 1а	21,0-22,9	25,1-28,0	20,0-29,0	15-75*	0,2	

\*При температурах воздуха 25°С и выше максимальные величины относительной влажности воздуха должны приниматься в соответствии с требованиями п. 6.5 в [14].

\*\*При температурах воздуха 26-28 °С скорость движения воздуха в теплый период года должна приниматься в соответствии с требованиями п. 6.6 в [14].

Таблица 17 – Оптимальные параметры микроклимата рабочего места

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Категория 1а	23-25	40-60	0,1
Теплый	Категория 1а	20-22	40-60	0,1

В зимнее время в помещении предусмотрена система отопления. Она обеспечивает достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В соответствии с характеристикой помещения определен расход свежего воздуха и приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры

Характеристика помещения	Объемный расход подаваемого в помещение свежего воздуха, м <sup>3</sup> /на одного человека в час
Объем до 20 м <sup>3</sup> на человека	Не менее 30
20...40 м <sup>3</sup> на человека	Не менее 20
Более 40 м <sup>3</sup> на человека	Естественная вентиляция

### 7.3 Освещённость рабочей зоны

Производственное освещение – неотъемлемый элемент условий трудовой деятельности человека. При правильно организованном освещении рабочего места обеспечивается сохранность зрения человека и нормальное состояние его нервной системы, а также безопасность в процессе производства. Производительность труда и качество выпускаемой продукции находятся в прямой зависимости от освещения.

Для создания наилучших условий для видения в процессе труда рабочие места должны быть нормально освещены. Требуемый уровень освещенности в первую очередь определяется точностью выполняемых работ (Таблица 19) и степенью опасности травмирования. Для характеристики точности выполняемых работ вводится понятие объекта различения – это наименьший размер рассматриваемого предмета, который необходимо различить в процессе работы.



Работа за ПК относится к зрительным работам высокой точности для помещений жилых и общественных зданий [15].

Таблица 19 – Нормирование освещённости для работы за ПК

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Относительная продолжительность зрительной работы при направлении и зрения на рабочую поверхность, %	Искусственное освещение				Естественное освещение	
					Освещённость на рабочей поверхности от системы общего освещения, лк	Цилиндрическая освещённость, лк	Объединённый показатель UGR, не более	Коэффициент пульсации освещённости К <sub>п</sub> , %, не более	КЕО е <sub>н</sub> , %, при	
									верхнем или комбинированном	боковом
Высокой точности	От 0,3 до 0,5	Б	1	Не менее 70	300	100*	21 18**	15	3,0	1,0
			2	Менее 70	200	75*	24 18**	20 15***	2,5	0,7

\* Дополнительно регламентируется в случаях специальных архитектурно-художественных требований.

\*\* Нормируемое значение объединённого показателя дискомфорта в помещениях при направлении линии зрения преимущественно вверх под углом 45° и более к горизонту и в помещениях с повышенными требованиями к качеству освещения (спальные комнаты в детских садах, яслях, санаториях, дисплейные классы в школах, средних специальных учебных заведениях и т.п.).

\*\*\* Нормируемое значение коэффициента пульсации для детских, лечебных помещений с повышенными требованиями к качеству освещения.

Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК [15], представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК

Освещённость на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа	300-500 лк
Освещённость на поверхности экрана ПК	не более 300 лк
Яркость бликов на экране ПК	не более 40 кд/м <sup>2</sup>
Яркость светящихся поверхностей находящихся в поле зрения	не более 200 кд/м <sup>2</sup>
Показатель ослеплённости для источников общего искусственного освещения в производственных помещениях	не более 20
Показатель дискомфорта в дошкольных и учебных помещениях	не более 15
Соотношения яркости:	
– между рабочими поверхностями	3:1–5:1
– между рабочими поверхностями и поверхностями стен и оборудования	10:1
Коэффициент пульсации:	не более 5%

## 7.4 Уровень шума на рабочем месте

Одним из важных факторов, влияющих на качество выполняемой работы, является шум. Шум ухудшает условия труда, оказывая вредное действие на

организм человека. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Такие нарушения в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека вплоть до стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Все это снижает работоспособность человека и его производительность, качество и безопасность труда. Длительное воздействие интенсивного шума (выше 80 дБ(А)) на слух человека приводит к его частичной или полной потере.

При выполнении основной работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ. Допустимые уровни звукового давления в помещениях для персонала, осуществляющего эксплуатацию ЭВМ при разных значениях частот, приведены в [16].

Для устранения шума необходимо прочистить вентилятор от пыли или заменить полностью.

## **7.5 Уровень электромагнитных излучений**

Электромагнитное поле (ЭМП) радиочастот характеризуется способностью нагревать материалы, распространяться в пространстве и отражаться от границы раздела двух сред, взаимодействовать с веществом. При оценке условий труда учитываются время воздействия ЭМП и характер облучения работающих.

Электромагнитные волны лишь частично поглощаются тканями биологического объекта, поэтому биологический эффект зависит от физических параметров ЭМП радиочастот: длины волны (частоты колебаний), интенсивности и режима излучения (непрерывный, прерывистый, импульсно-модулированный), продолжительности и характера облучения организма

(постоянное, интермиттирующее), а также от площади облучаемой поверхности и анатомического строения органа или ткани. Степень поглощения энергии тканями зависит от их способности к ее отражению на границах раздела, определяемой содержанием воды в тканях и другими их особенностями. При воздействии ЭМП на биологический объект происходит преобразование электромагнитной энергии внешнего поля в тепловую, что сопровождается повышением температуры тела или локальным избирательным нагревом тканей, органов, клеток, особенно с плохой терморегуляцией (хрусталик, стекловидное тело, семенники и др.). Тепловой эффект зависит от интенсивности облучения.

В данной выпускной работе будет рассматриваться такой источник электромагнитного поля, как персональный компьютер.

По [17,18] энергетическая экспозиция за рабочий день не должна превышать значений, указанных в таблице 21.

Таблица 21 – ПДУ энергетических экспозиций ЭМП диапазона частот  $\geq 30$  кГц - 300 ГГц

Диапазоны частот	Предельно допустимая энергетическая экспозиция		
	По электрической составляющей, (В/м) <sup>2</sup> × ч	По магнитной составляющей, (А/м) <sup>2</sup> × ч	По плотности потока энергии (мкВт/см <sup>2</sup> ) × ч
30 кГц - 3 МГц	20000,0	200,0	-
3 - 30 МГц	7000,0	-	-
30 - 50 МГц	800,0	0,72	-
50 - 300 МГц	800,0	-	-
300 МГц - 300 ГГц	-	-	200,0

Для обеспечения меньшего электромагнитного излучения использован жидкокристаллический монитор. Необходимо учитывать расстояние до монитора, так как при большем расстоянии от человека оказывается меньшее влияние. В связи с тем, что электромагнитное излучение от стенок монитора намного больше, необходимо ограничивать его стенами, т.е. ставить в углу. Необходимо чтобы компьютер был заземлен, а также необходимо по возможности сокращать время работы за компьютером.

## 7.6 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

При работе с компьютером существует опасность электропоражения:

- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ПЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- имеется опасность короткого замыкания в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развертки.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. По [19] помещение, в котором находится рабочее место, относится к категории помещений без повышенной опасности. Его можно охарактеризовать, как сухое, непыльное, с токонепроводящими полами и нормальной температурой воздуха. Температурный режим, влажность воздуха, химическая среда не способствуют разрушению изоляции электрооборудования.

Безопасность при работе с электроустановками обеспечивается применением различных технических и организационных мер. Основные технические средства защиты от поражения электрическим током:

- изоляция токопроводящих частей и ее непрерывный контроль;
- предупредительная сигнализация и блокировки;
- защитное заземление;
- зануление;
- защитное отключение по [19].

## **7.7 Экологическая безопасность**

В процессе работы в помещении осуществляется водоснабжение и образование бытовых сточных вод (помещения гигиены и водопотребления). Сточные воды передаются в сточные системы. Для утилизации макулатуры рядом с принтером установлена специальная урна, предназначенная для накопления всех ненужных печатных материалов. После наполнения урны, работник предприятия обязан изыскивать средства для того, чтобы отправить данные накопители бумажного мусора на станцию вторсырья. Далее вся эта бумага идет на переработку как вторичное сырье. При поломке части ЭВМ или выхода из срока службы люминесцентных ламп отдельно происходит утилизация неисправленной части или лампы.

## **7.8 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

В данном подразделе рассматриваются вероятные чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть при разработке или эксплуатации проектируемого решения. Чрезвычайные ситуации могут быть техногенного, природного, биологического, социального или экологического характера. В нашем случае наиболее вероятной ситуацией может являться пожар в помещении. Так как разработка и эксплуатация происходит в учебной аудитории рассмотрим наши действия при возникновении пожароопасной ситуации.

Пожарная безопасность может быть обеспечена мерами пожарной профилактики и активной пожарной защиты. Пожарная профилактика включает комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожара или уменьшение его последствий. Активная пожарная защита – меры, обеспечивающие успешную борьбу с пожарами или взрывоопасной ситуацией.

Возникновение пожара в помещении, где установлена вычислительная и оргтехника, приводит к большим материальным потерям и возникновению чрезвычайной ситуации. Чрезвычайные ситуации приводят к полной потере

информации и большим трудностям восстановления всей информации в полном объёме.

Согласно нормам технологического проектирования [20], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания - на категории А, Б, В, Г и Д.

Данное помещение относится к категории В [20], производства, связанные с обработкой или применением твердых сгораемых веществ и материалов.

Для исключения возникновения пожара необходимо:

- вовремя выявлять и устранять неисправности;
- не использовать открытые обогревательные приборы, приборы кустарного производства в помещении лаборатории;
- определить порядок и сроки прохождения противопожарного инструктажа и занятий по пожарно-техническому минимуму, а также назначить ответственного за их проведения.

В случае возникновения пожара необходимо отключить электропитание, вызвать по телефону пожарную команду, произвести эвакуацию и приступить к ликвидации пожара огнетушителями. При наличии небольшого очага пламени можно воспользоваться подручными средствами с целью прекращения доступа воздуха к объекту возгорания.

Для тушения пожаров в помещении необходимо установить углекислотный огнетушитель типа ОУ-5.

Покидать помещение согласно плану эвакуации, на рисунке 102.

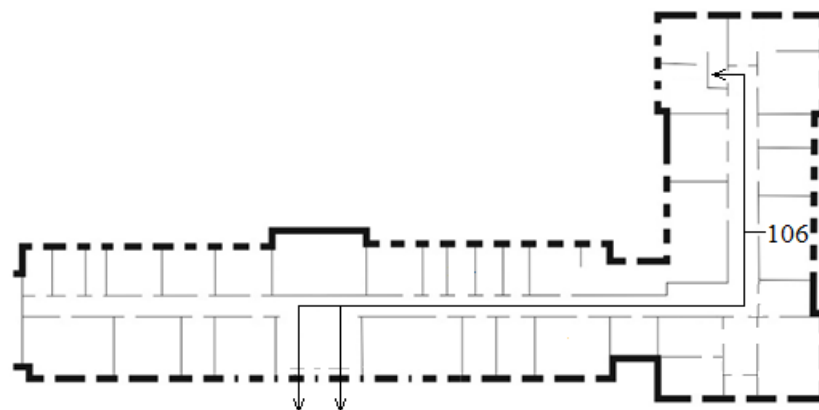


Рисунок 102 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса №10, пр. Ленина, 2, 1 этаж

## 7.9 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

### 7.9.1 Эргономические требования к рабочему месту

Приведём план расположения периферии рабочего места студента (Рисунок 103).

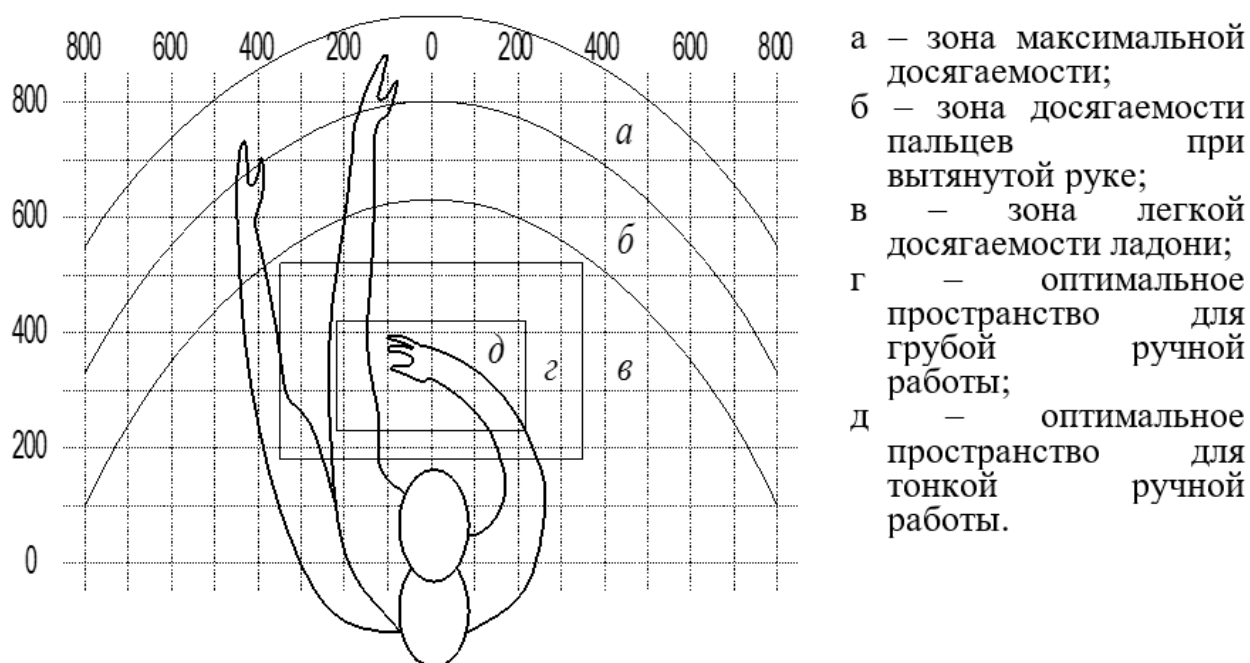


Рисунок 103 – Зоны досягаемости рук на рабочем месте в горизонтальной плоскости

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости:

- дисплей размещается в зоне *a* (в центре);
- системный блок размещается в предусмотренной нише стола;
- клавиатура – в зонах *г/д*;
- «мышь» – в зоне *в* справа;
- сканер в зонах *а/б* (слева);
- принтер находится в зоне *а* (справа);
- документация, необходимая при работе – в зоне легкой досягаемости ладони – *в*, а в выдвижных ящиках стола – литература, неиспользуемая постоянно.

На рисунке 104 показан пример размещения основных и периферийных составляющих ПК на рабочем столе студента.

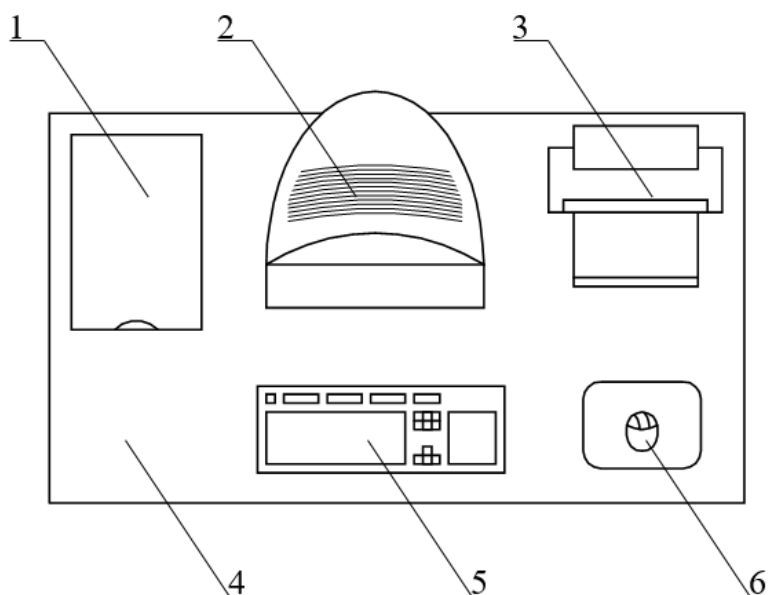


Рисунок 104 – Размещение основных и периферийных составляющих ПК

Где 1 – сканер, 2 – монитор, 3 – принтер, 4 – поверхность рабочего стола, 5 – клавиатура, 6 – манипулятор типа «мышь».

Для комфортной работы эргономика рабочего пространства должна удовлетворять требованиям к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы [21].



### **7.9.2 Окраска и коэффициенты отражения**

В зависимости от ориентации окон рекомендуется следующая окраска стен и пола:

- окна ориентированы на юг – стены зеленовато-голубого или светло-голубого цвета, пол – зеленый;
- окна ориентированы на север – стены светло-оранжевого или оранжево-желтого цвета, пол – красновато-оранжевый;
- окна ориентированы на восток – стены желто-зеленого цвета, пол зеленый или красновато-оранжевый;
- окна ориентированы на запад – стены желто-зеленого или голубовато-зеленого цвета, пол зеленый или красновато-оранжевый.

В помещениях, где находится компьютер, необходимо обеспечить следующие величины коэффициента отражения для потолка 60-70, для стен 40-50, для пола около 30.

### **7.9.3 Особенности законодательного регулирования проектных решений**

Продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю.

Не рекомендуется работать за компьютером более 6 часов за смену;

- рекомендуется делать перерывы в работе за ПК продолжительностью 10 минут через каждые 50 минут работы;
- продолжительность непрерывной работы за компьютером без регламентированного перерыва не должна превышать 2 часов;
- во время регламентированных перерывов целесообразно выполнять комплексы упражнений;
- при нерегламентированной работе повышенной интенсивности возможны головные боли, нервные срывы и др.

Государственный надзор и контроль в организациях независимо от организационно-правовых форм и форм собственности осуществляют

специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с федеральными законами [22].

К таким органам относятся:

- Федеральная инспекция труда.
- Государственная экспертиза условий труда Федеральная служба по труду и занятости населения (Минтруда России Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Госгортехнадзор, Госэнергонадзор, Госатомнадзор России)).
- Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Госсанэпиднадзор России) и др.

Так же в стране функционирует Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), положение о которой утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации, в соответствии с которым, система объединяет органы управления, силы и средства.

## **Заключение**

Результатом выполнения магистерской диссертационной работы является компонентная модель стенда обезвешивания для КБС космического аппарата типа «Экспресс-2000».

Созданная модель стенда позволяет получать необходимую информацию о перемещениях и скоростях движения каждого из элементов КБС, углах раскрытия и угловой скорости каждого ШУ, углах отклонения от вертикали тросов каждой следящей системы кареток, перемещениях и скоростях движения каждой продольной и поперечной каретки.

Полученные результаты планируется использовать для оптимизации алгоритмов управления подвесов, представляющих собой систему следящих кареток, а также требований к характеристикам применяемых на стенде измерительных и исполнительных устройств.

Реализованная визуализация позволяет наглядно продемонстрировать процессы (этапы зачековки шарнирных устройств КБС, колебания крыла после выхода в рабочее состояние), происходящие при раскрытии крупногабаритных космических конструкций.

Проведение данной ВКР осуществлялось с приемлемыми для космической отрасли ресурсозатратами, стоимость которой оценена в 524614 рубля. При выполнении ВКР были соблюдены все требования электро- и пожаробезопасности.

## Список публикаций

1. Создание компонентной модели процесса развёртывания крыла солнечной батареи в среде MATLAB / А.В. Воронин // XIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии», Том 1, 9-13 ноября 2015 г., с. 259-260.
2. Сравнение методов визуализации физической модели в SIMULINK / А.В. Воронин // IV Всероссийский молодёжный Форум с международным участием «Инженерия для освоения космоса», Том 1, 12-14 апреля 2016 г., с. 196-198.
3. Modeling of a Solar Arrays Deployment Process at Ground Tests of Mechanical Devices on Active Gravity Compensation Systems / I.K. Shpyakin, A.M. Malysenko, A.V. Voronin // 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2017), Vladivostok, Russia, 25-29 September, 2017 (Unpublished).
4. Analysis of noisy signal restoration quality with Lanczos filter / A.S. Belyaev, I.A. Tutov // Published under licence by IOP Publishing Ltd., IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 177, Issue 1.

## Список использованных источников

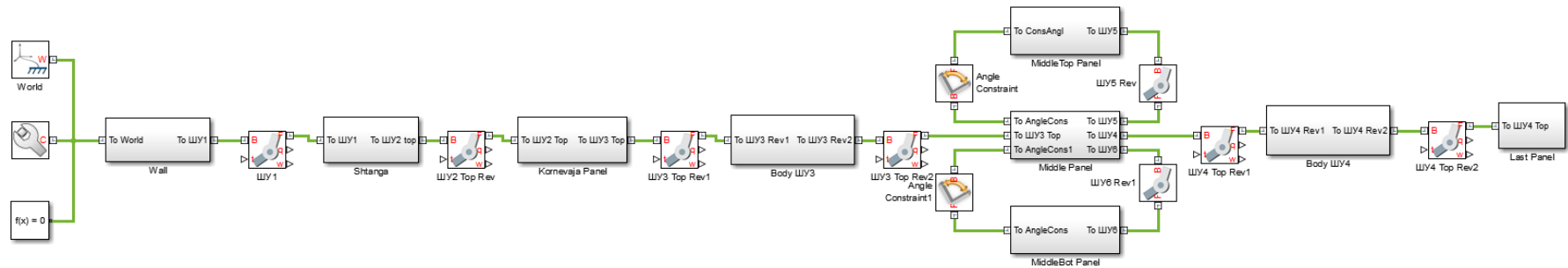
1. Техническое задание на составную часть ОКР «Разработка, изготовление и испытания системы обезвешивания автоматизированной активной много-канальной» (шифр «Кемчуг-КТИ») 774.ТЗ345-3210-14. – ОАО «ИСС», 2014. – 12 с.
2. Исходные данные на опытно-конструкторскую работу «Разработка, изготовление и испытания системы обезвешивания автоматизированной активной многоканальной». Шифр ОКР: «Кемчуг-КТИ. 774.ИД 345-0051-14. – ОАО «ИСС», 2014. – 23 с.
3. Особенности расчета раскрытия крупногабаритных трансформируемых конструкций различных конфигураций / Зимин В.Н., Крылов А.В., Мешковский В.Е., Сдобников А.Н., Файзуллин Ф.Р., Чурилин С.А. – М.: Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 10. С. 179–191.
4. Крылов А.В. Моделирование раскрытия солнечных батарей различных конфигураций / Чурилин С.А. – М.: Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», 2011. – 7 с.
5. Асланов В.С. Динамика систем твёрдых тел переменной структуры: Электронное учебное пособие / Юдинцев В.В. – М.: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2010. – 106 с.
6. Юдинцев В.В. Динамика систем твёрдых тел: Учебное пособие – М., 2008. – 111 с.
7. Борzych С.В. Моделирование и экспериментальная отработка процесса раскрытия крупногабаритных многозвенных солнечных батарей космических аппаратов / Ильясова И.Р. – М.: Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», 2012. – 9 с.
8. Моделирование процесса раскрытия солнечных батарей / Д.В. Бакулин, С.В. Борzych, Н.С. Ососов, Ю.Н. Щиблев. – М.: Матем. Моделирование, 2004, том 16, номер 6, 88–92 с.

9. Wallrapp, O. Simulation of Deployment of a Flexible Solar Array / Wiedemann, S. Multibody System Dynamics. – 2002. – P. 18.
10. Бушуев А.Ю. Математическое моделирование процесса раскрытия солнечной батареи большой площади / Фарафонов Б.А. – М.: Математическое моделирование и численные методы, 2014, № 2, с. 101–114.
11. Борисов М.В. Моделирование движения космического аппарата с упругими элементами / Авраменко А.А. – М.: Вестник удмуртского университета. Вып. 2, 2009. – 12 с.
12. Бакулин, Д. В. Моделирование процесса раскрытия солнечных батарей / Д.В. Бакулин, С.В. Борzych, Н.С. Ососов, Ю.Н.Щиблев – М.: Известия РАН. Математическое моделирование, 2004, том 16, № 6., с. 88–92.
13. Юдинцев, В.В. Моделирование процессов раскрытия многоэлементных конструкций космических аппаратов / В.В. Юдинцев – М.: Полет, 2012, № 5., с. 28–33.
14. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
15. СП 52.13330.2011 Свод правил. Естественное и искусственное освещение.
16. СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
17. СанПиН 2.1.8/2.2.4.2490-09. Электромагнитные поля в производственных условиях.
18. СанПиН 2.2.1/2.1.1.2585-10. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.
19. ГОСТ Р 12.1.019-2009 (изм. №1) ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

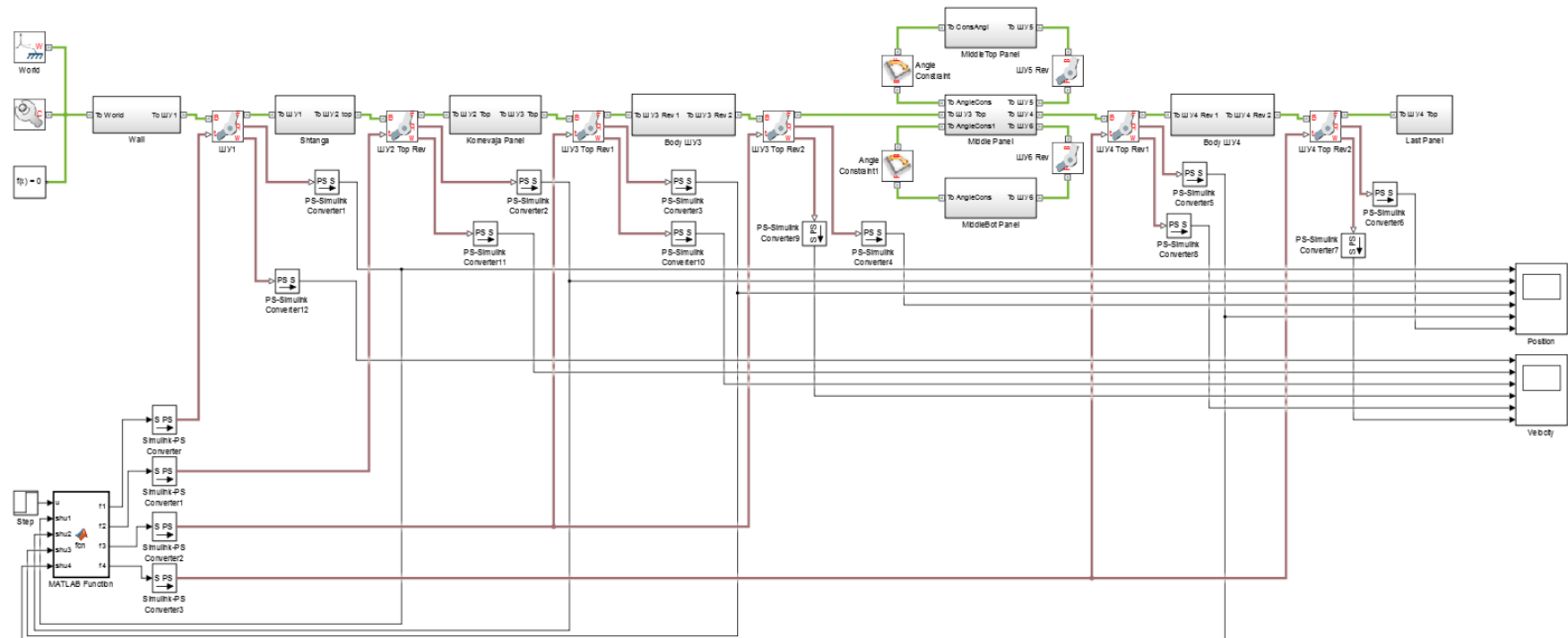
20. НПБ 105-03. Нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
21. СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.
22. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ.

## Приложение А

### Итоговая модель без системы управления



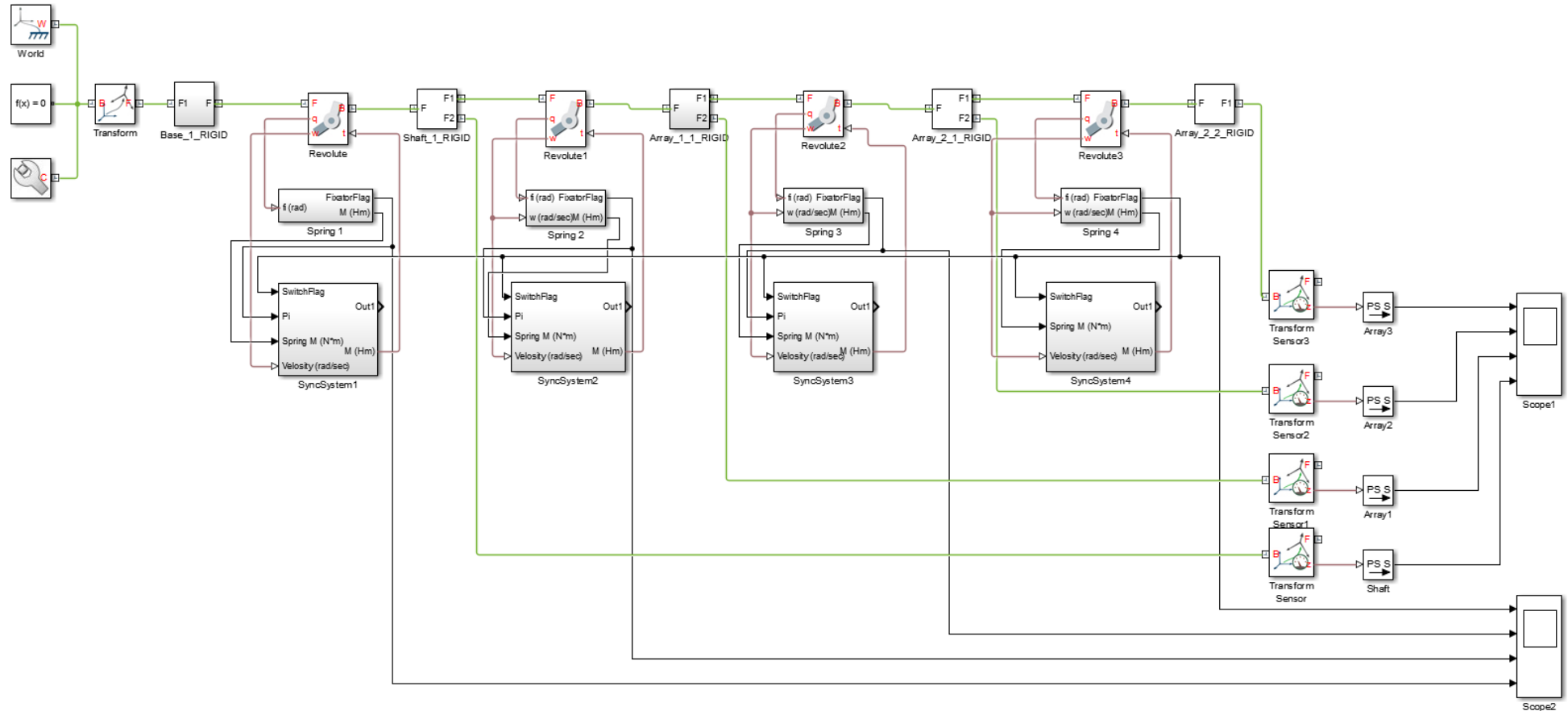
### Итоговая модель с системой управления





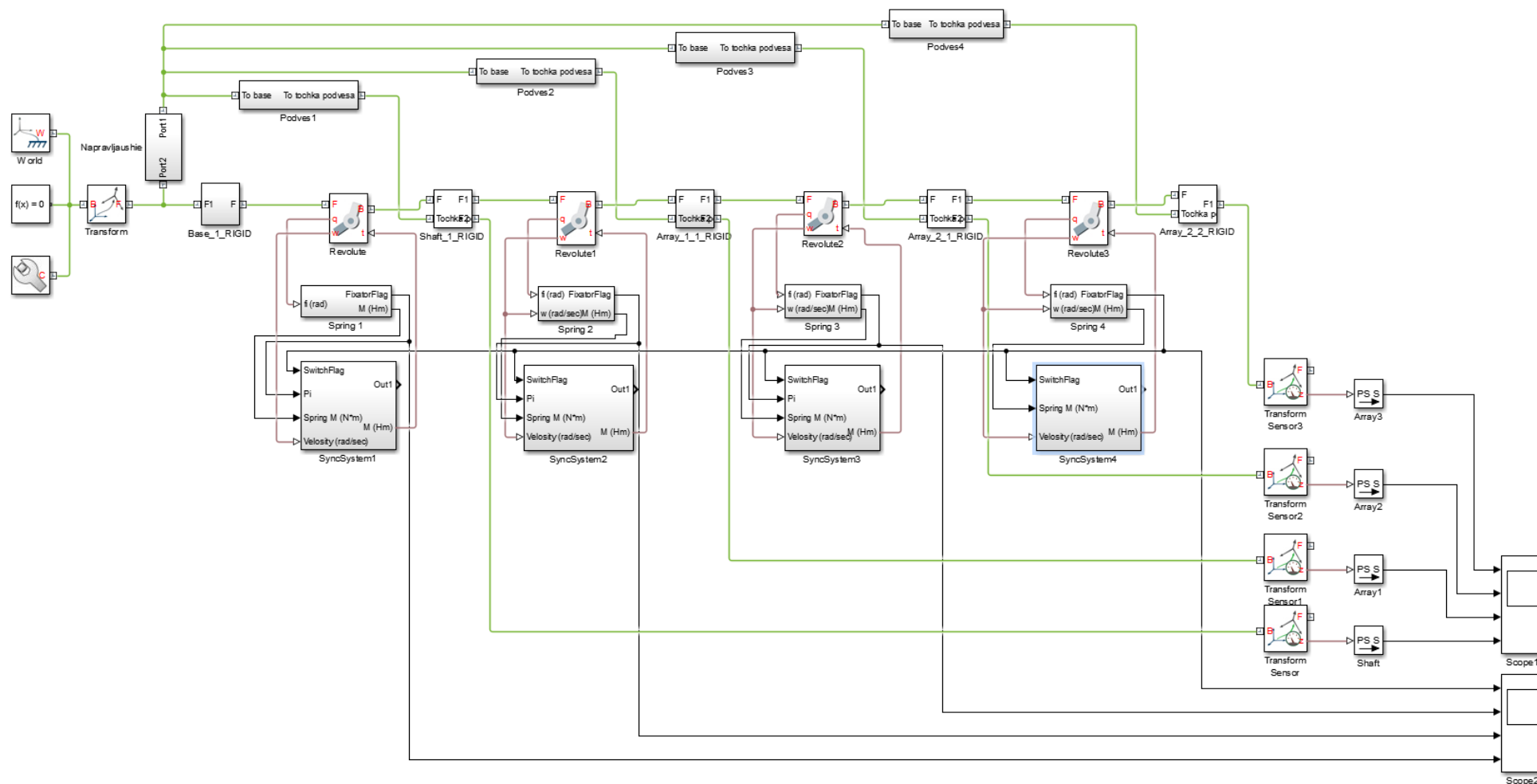
## Приложение Б

### Итоговая модель крыла батареи солнечной типа «Экспресс-2000»



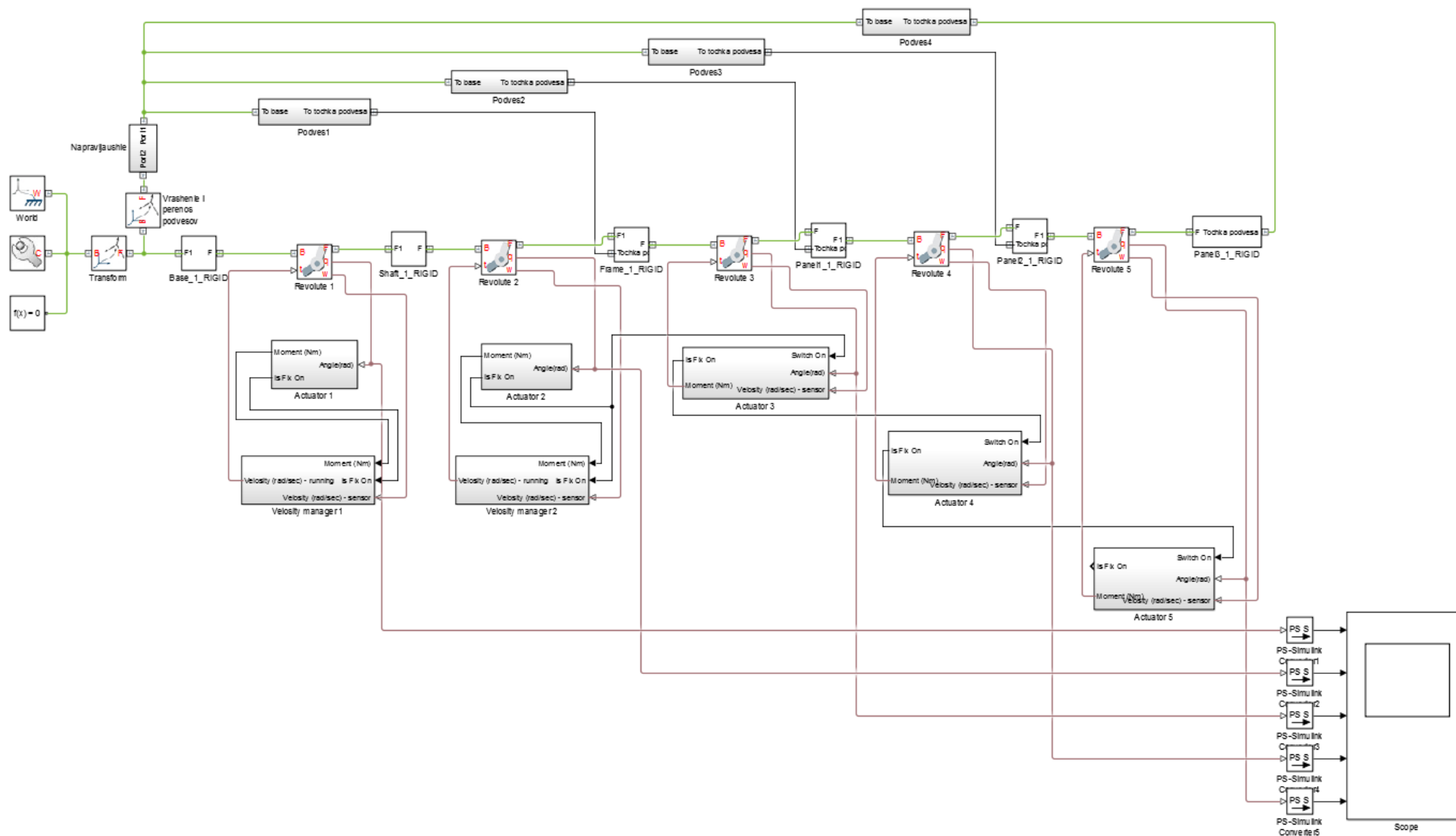
## Приложение В

### Итоговая модель крыла батареи солнечной типа «Экспресс-2000» с системами продольных и поперечных кареток



## Приложение Г

### Итоговая модель крыла батареи солнечной типа «ГЛОНАСС-К2» с системами продольных и поперечных кареток



# Приложение Д



## Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни				Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
						$T_{рд}$		$T_{кд}$	
		$t_{min}$	$t_{prob}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	1	1	3	1,3	1,60	–	1,93	–
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	2	3	5	3,2	3,80	0,38	4,58	0,46
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	7	10	14	10,2	3,66	12,20	4,41	14,70
Разработка календарного плана	НР, И	2	3	4	3,0	3,60	0,72	4,34	0,87
Обсуждение литературы	НР, И	1	3	4	2,8	1,36	3,40	1,64	4,10
Выбор структурной схемы модели стенда	НР, И	1	1	3	1,3	1,60	1,12	1,93	1,35
Выбор принципиальной схемы модели стенда	НР, И	7	15	21	14,7	10,56	17,60	12,72	21,21
Создание модели стенда	НР, И	30	70	90	66,7	8,00	80,00	9,64	96,40
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	7	10	14	10,2	–	12,20	–	14,70
Оформление графического материала	И	7	10	14	10,2	–	12,20	–	14,70
Подведение итогов	НР, И	5	7	8	6,8	4,92	8,20	5,93	9,88
<b>Итого:</b>					<b>130,3</b>	<b>39,10</b>	<b>148,02</b>	<b>47,12</b>	<b>178,36</b>

# Приложение Е

## Линейный график работ

Этап	НР	И	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
			30	60	90	120	150	180	210
1	1,93	–							
2	4,58	0,46							
3	4,41	14,70							
4	4,34	0,87							
5	1,64	4,10							
6	1,93	1,35							
7	12,72	21,21							
8	9,64	96,40							
9	–	14,70							
10	–	14,70							
11	5,93	9,88							

НР –  ; И –  ;

Приложение Д  
(обязательное)

**Section 3**

**Component model of satellite solar array wing development in  
Matlab/Simulink/SimMechanics 2 Gen**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ51	Майков С.А.		

Консультант кафедры СУМ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф.	Рудницкий В.А.			

Консультант – лингвист кафедры ИЯ МК

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель каф.	Бутакова Т.И.			



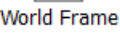
modeling objects mechanical side. For example, there is no need to show every detail of joint-hinge mechanism. It is enough to simply show its presence.

Let us define the main points of model development in SimMechanics second generation.

- To show physical body, we need specify coordinate system of center figure with help of Rigid Transform block. Then we adjust Solid block to our Rigid Transform block and define its physical data in properties of the block (Fig. 8). We can combine several simple figures to make more complicated shapes. To do that we need to make one Rigid Transform parent coordinate system which would be our center of mass and the others would be associated with it (Fig. 13).
- SimMechanics 2 Gen add-on has its own original coordinate system as World Frame block which coordinates (0,0,0) and axis directions cannot be changed. As an alternative we can add Rigid Transform block right after World block and make it the main parent coordinate system. In that case we can redirect its axis and change its position relative to World.
- As an initial state of solar array wing we will assume its folded (shipping) state of solar array wing.
- Each included body would be defined as it would be in its initial state.
- Alternatively, we can define states of solar array wing panel in its deployed states. That composition is much simpler and intuitive but it worse from visualization point of view since we skip deployment process.
- On that model development stage, we would research only horizontal part of deployment process with consideration of side panels size and mass.

Now we describe the main package of block to create solar array wing model.



1)World Frame . This block represents the global reference frame in a model. This frame is inertial and at absolute rest. Rigidly connecting a frame to the



World frame makes that frame inertial. Frame axes are orthogonal and arranged according to the right-hand rule.

In a frame network, the World frame is the ultimate reference frame. Directly or indirectly, all other frames are defined with respect to the World frame. If multiple World Frame blocks connect to the same frame network, those blocks identify the same frame. If no World Frame block connects to a frame network, a copy of an existing frame, frozen in its initial position and orientation, serves as the World frame.



Mechanism Configuration

2) Mechanism Configuration . This block provides mechanical and simulation parameters to a mechanism, i.e., a self-contained group of interconnected Simscape Multibody blocks. Parameters (Fig. 2) include gravity and a linearization delta for computing numerical partial derivatives during linearization. These parameters apply only to the target mechanism, i.e., the mechanism that the block connects to.

The Mechanism Configuration block is optional.

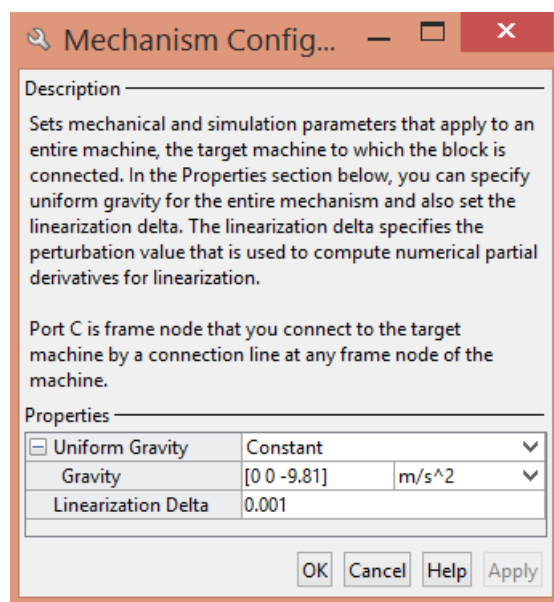
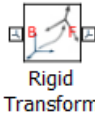


Fig. 2. Mechanical Environment block properties



3) Rigid Transform . This block applies a time-invariant transformation between two frames. The transformation rotates and translates the follower port frame (F) with respect to the base port frame (B). Connecting the frame ports in reverse causes the transformation itself to reverse. The frames remain fixed with respect to each other during simulation, moving only as a single unit. Combined Rigid Transform and Solid blocks model compound rigid bodies. Its properties shown on figure 3.

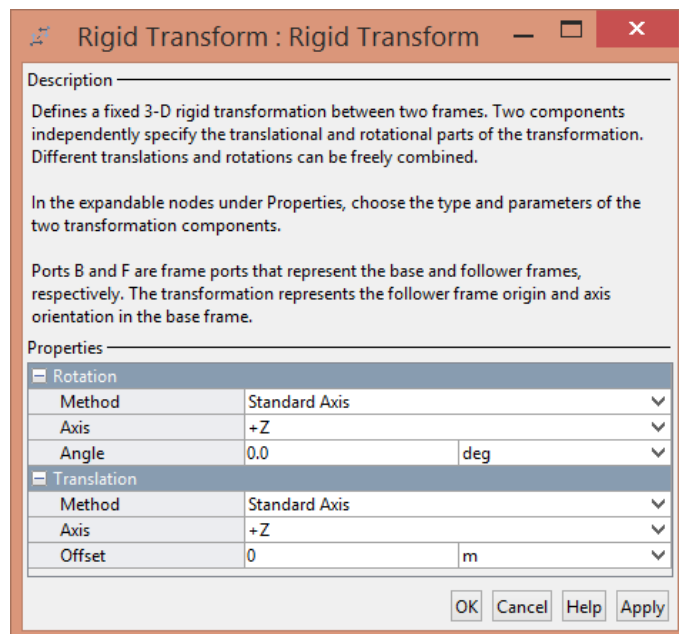


Fig. 3. Rigid Transform block properties

Let us make an example of how Rigid Transform block works. To do that we need to create blank model and put two Rigid Transform blocks and call them 1Frame and 2Frame (Fig. 4).

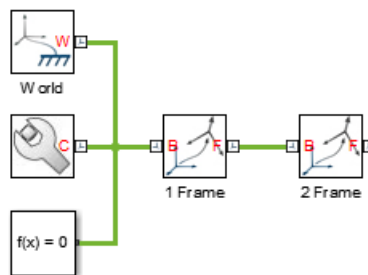


Fig. 4. Workspace of blank model with two Rigid Transform blocks

Properties of 1Frame didn't change (Fig. 5). Then its axis would be aligned and position would be the same as World. Coordinate system of 2Frame we turn on 90 degrees relative to positive X axis and change its position on 1 meter in space along Y axis (Fig. 6). The results are shown on figure 7.

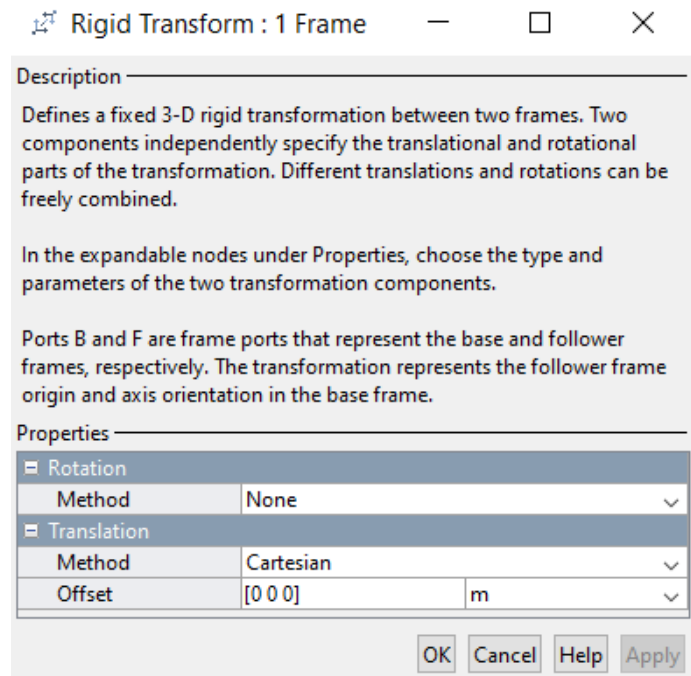


Fig. 5. Properties of 1Frame block

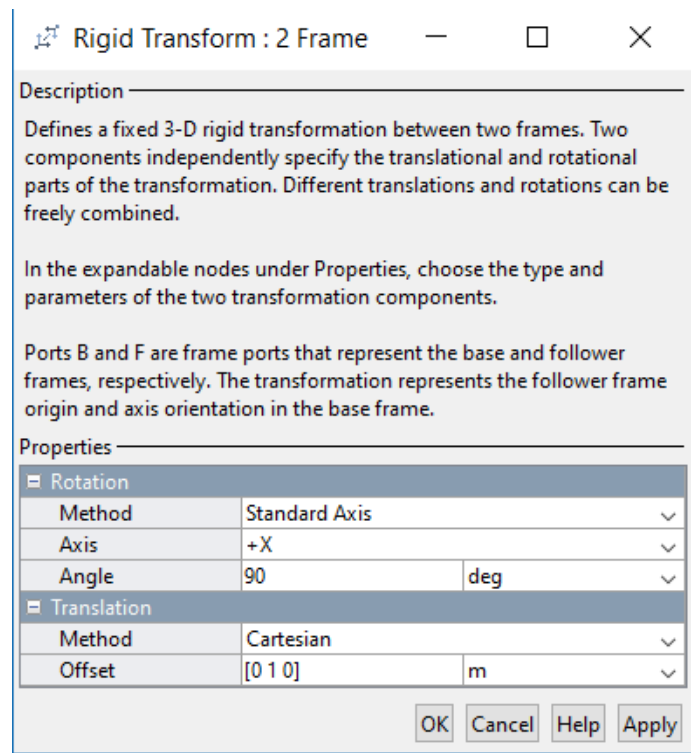


Fig. 6. Properties of 2Frame block

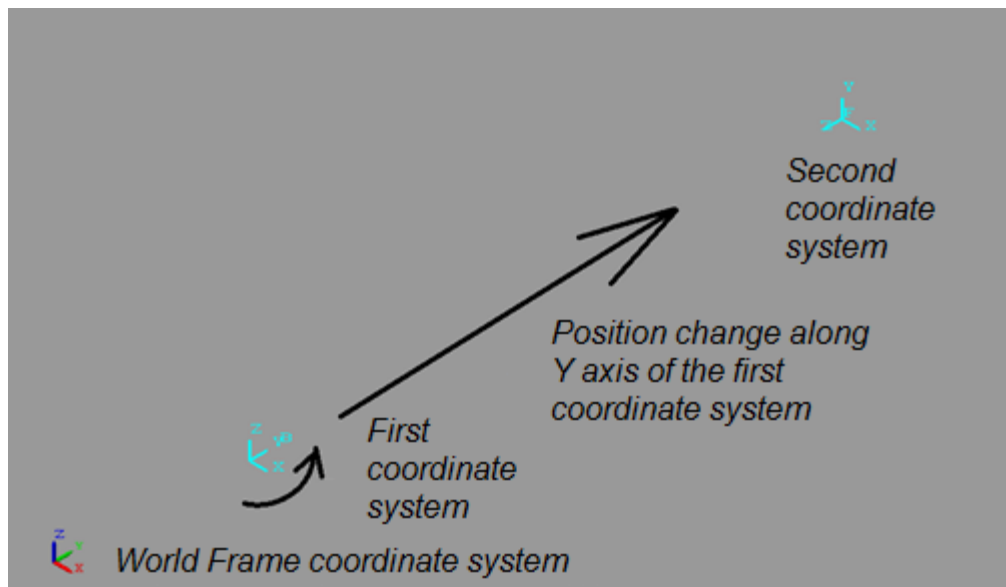


Fig. 7. Visualization of the example model

Fig. 7 shows that axis of first coordinate system replicate directions of World coordinate system. The second coordinate system change its position in space along Y axis. Also directions of its axis changed due to turn on 90 degrees relative to X axis.



4)Solid **Solid** . The Solid block adds a solid element with geometry, inertia, and color to the attached frame (Fig. 8). The solid element can be a simple rigid body or part of a compound rigid body — a group of rigidly connected solids, often separated in space through rigid transformations (Fig. 9).

Geometry parameters include shape and size. We can choose from a list of preset shapes or import a custom shape from an external file in STL or STEP format. By default, for all but STL-derived shapes, the block automatically computes the solid inertia from the specified geometry and mass or mass density. We can change this setting in the Inertia > Type block parameter.

The block dialog box contains a collapsible visualization pane. This pane provides instant visual feedback on the solid you are modeling. We can use it to find and fix any issues with the shape and color of the solid. We can examine the solid from different perspectives by selecting a standard view or by rotating, panning, and zooming the solid.

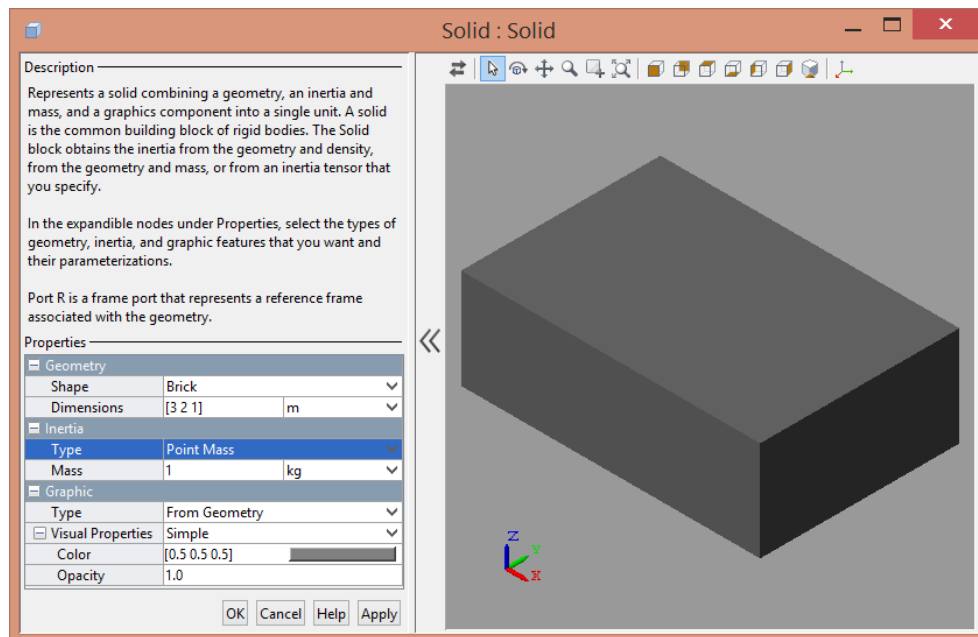


Fig. 8. Properties of Solid block

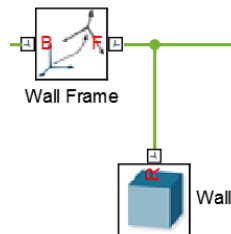


Fig. 9. Example of using Solid block in a model



##### 5) Joints

. Each block of that group represents particular degree of freedom variety (Figure 10). For example, Prismatic Joint (Figure 11) represents joint between two frames (Rigid Transforms). This joint has one translational degree of freedom represented by one prismatic primitive. Revolute joint has one rotational degree of freedom represented by one revolute primitive. Telescoping Joint has three rotational and one translational degrees of freedom represented by one spherical primitive and one prismatic primitive.

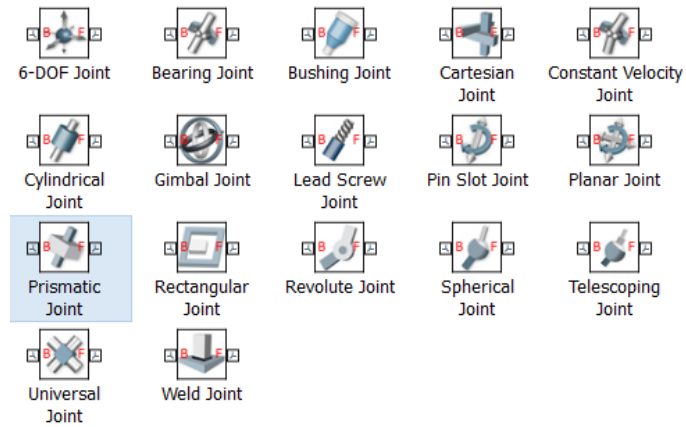


Fig. 10. Joints block group

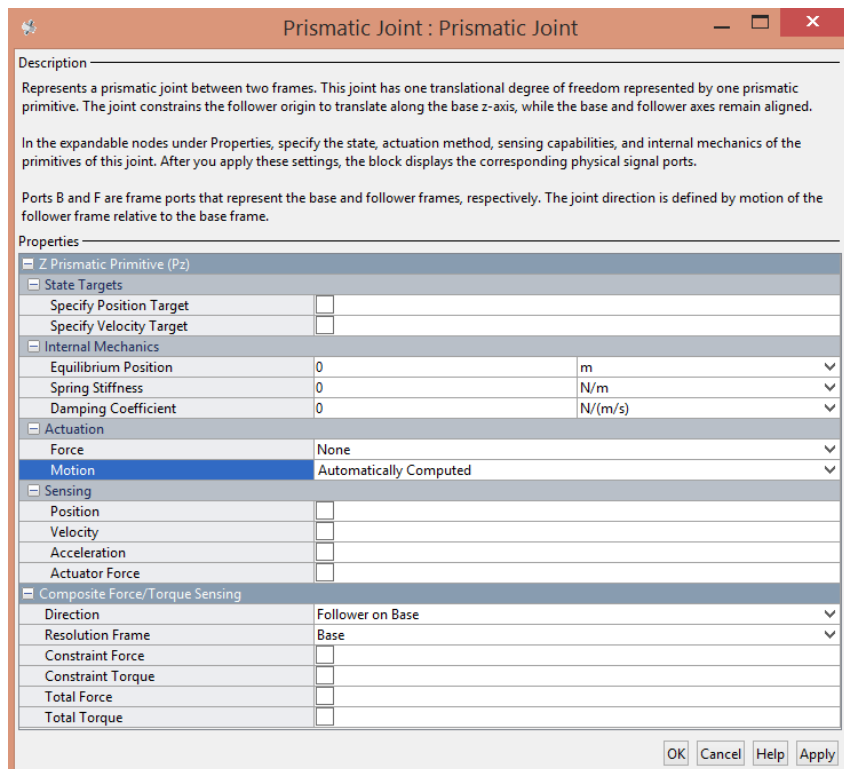


Fig. 11. Properties of Prismatic Joint

Degrees of freedom in SimMechanics 2 Gen specified relative to Rigid Transforms blocks (Fig. 12).

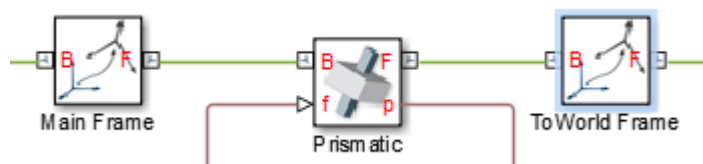


Fig. 12. Example of inclusion Joint block in a model

Further would be described stages of developing different solar array wing elements. To simplify navigation throughout the model workspace each part of solar array wing combined into subsystems.

### 3.2 Shaft model

First of all, let us split Shaft on 6 pieces for each part that separated by bend (Fig. 1). The results are shown on figures 13 and 14. Let us assume that rod diameter of each shaft parts equal to 100 mm.

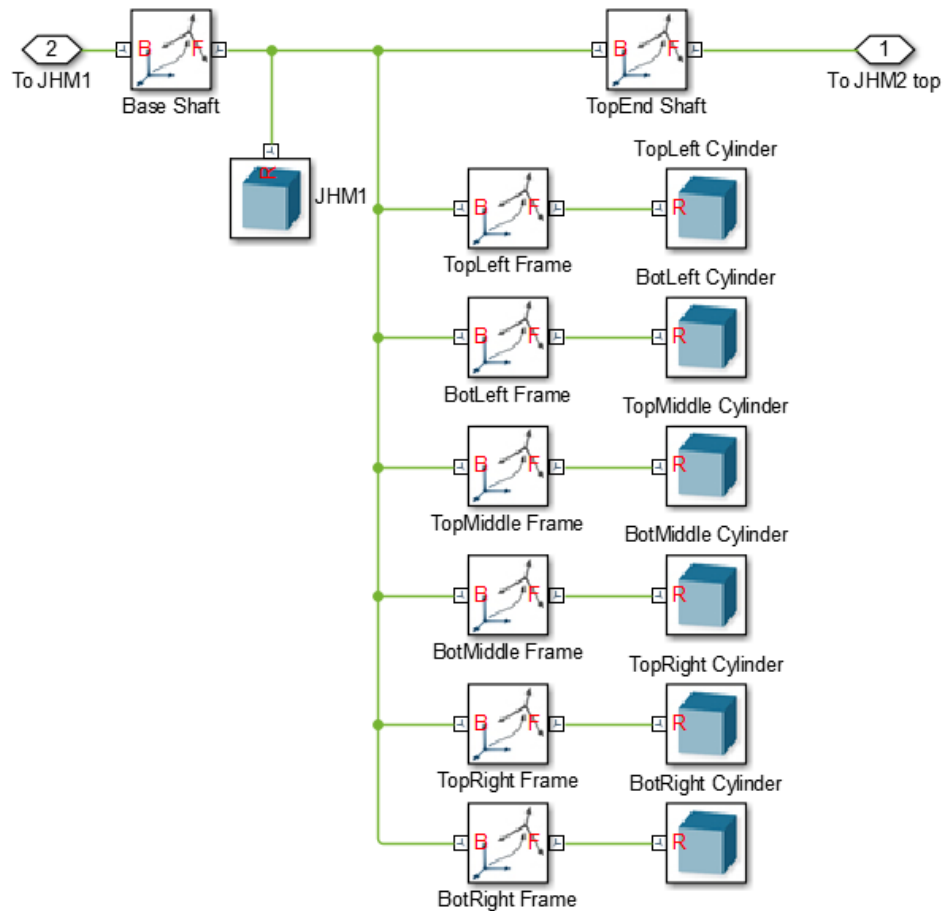


Fig. 13. Shaft model in Simulink

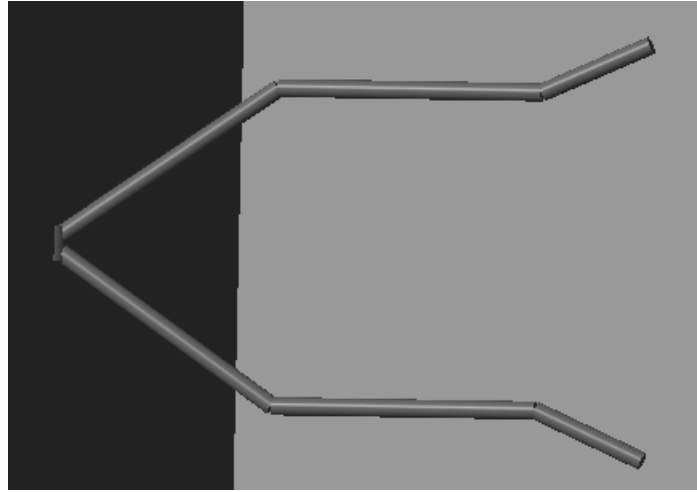


Fig. 14. Shaft model visualization

Let us describe what each part of the Shaft model stands for.

Two Rigid Transform blocks Base Shaft and TopEnd Shaft are the nodes which represents joints to the adjusted solar array wing components. Therefore, Base Shaft is parent coordinate system for whole Shaft subsystem. Shaft subsystem movement are assigned by JHM1 joint (Fig. 15). TopEnd Shaft is a base in respect of which would be moving nest adjusted part of solar array wing with help of JHM2 Top Rev joint.

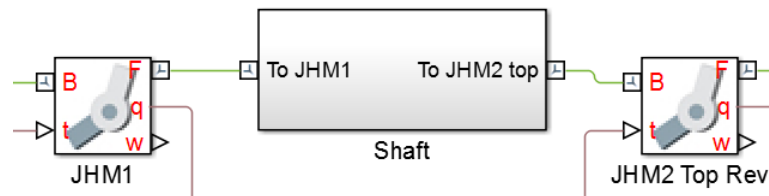


Fig. 15. Shaft subsystem in Simulink

The rest are physical model blocks. Each of Rigid Transform blocks (TopLeft Frame, BotLeft Frame, TopMiddle Frame, BotMiddle Frame, TopRight Frame, BotRight Frame) are centers of mass for each part of the shaft. To each Rigid Transform blocks adjusted Solid block which represents physical body.

Solid block JHM1 represents joint-hinge mechanism between wall and shaft.

Similar structure (Fig. 13) would be used in the rest part of solar array wing model.



### 3.3 Base panel

Each solar array wing panel would be shaped as brick with due attention to sizes shown on figure 1.

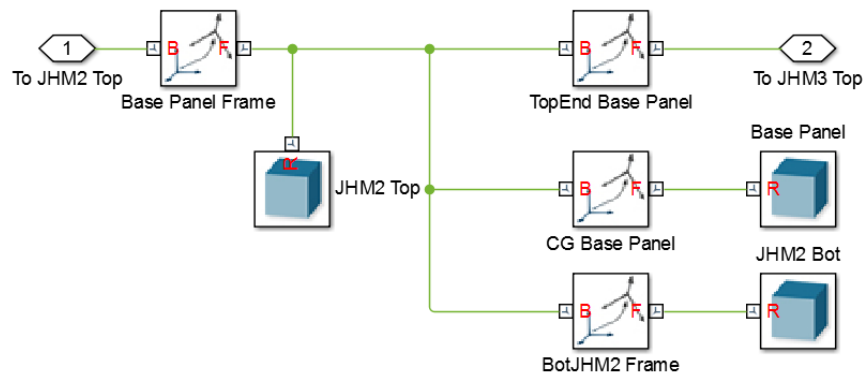


Fig. 16. Base Panel subsystem



Fig. 17. Base panel visualization as a part of solar array wing model

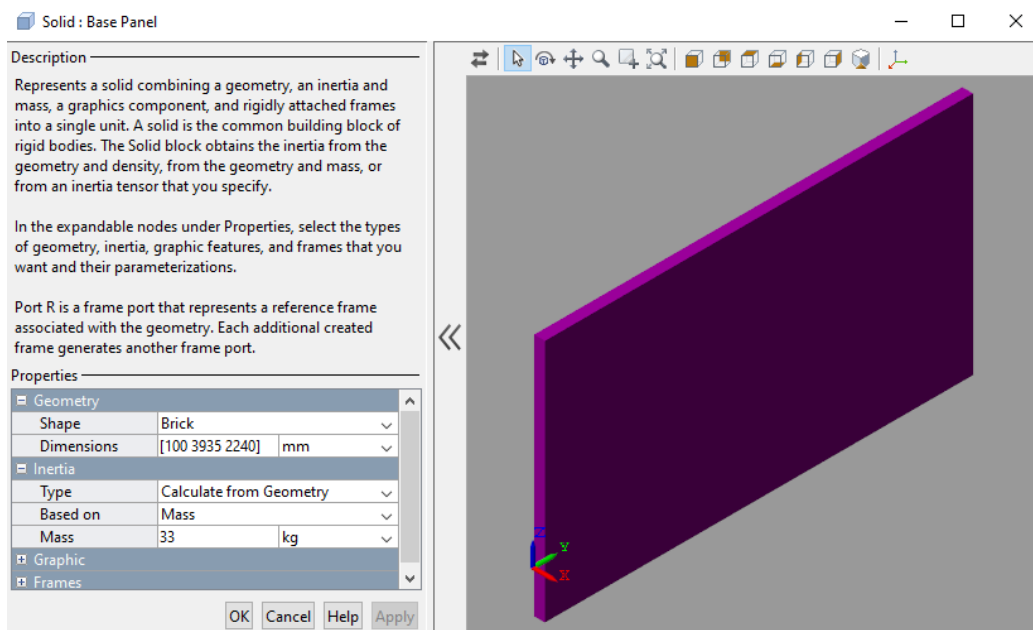


Fig. 18. Base panel's solid block properties

Let us describe what each part of the Base panel model stands for.

Rigid Transform Base Panel Frame is parent coordinate system for whole Base Panel subsystem. TopEnd Base Panel is a base in respect of which would be moving next adjusted part of solar array wing with help of JHM3 Top Rev1 joint.

CG Base Panel and BotJHM2 Frame are centers of mass for Solid blocks Base Panel and JHM2 Bot.

Properties of Base Panel Solid block includes mass and size characteristics according technical requirements of whole work (mass = 33 kg, size is taken according to figure 1, thickness = 100 mm).

### 3.4 Third joint-hinge mechanism

Right after Base panel are attached package of three panels (top and bottom side panel that attached to middle panel). Before we start creating the package we need to solve the problem of special type JHM which connects base and middle panel considering the gap in the form of top side panel. Figure 19 shows the third JHM scheme.

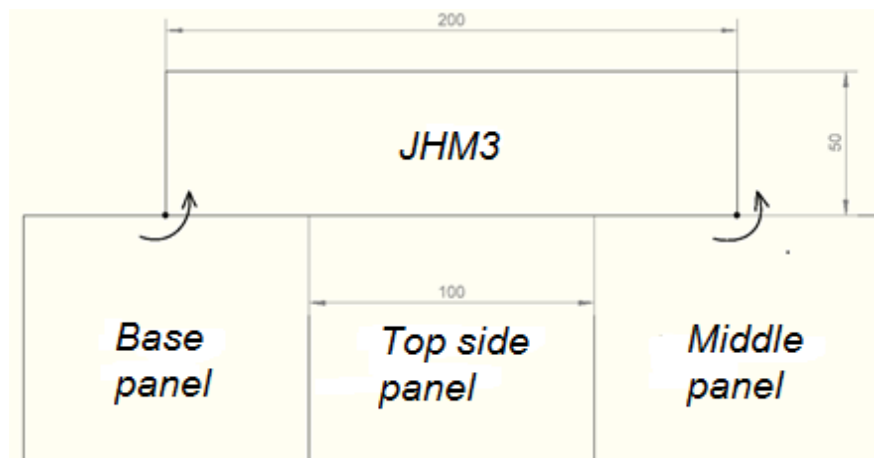


Fig. 19. JHM3 scheme

Figure 20 shows JHM3 subsystem composition. Figure 21 – JHM3 Solid block properties. JHM3 subsystem includes: BaseFrame JHM3 Rigid Transform block which represents JHM3 physical model center of mass; JHM3 Top Solid block which represents physical body; RevMiddlePanel Frame Rigid Transform block in respect of which would be moving next adjusted part of solar array wing with help of JHM3 Top Rev2 joint.

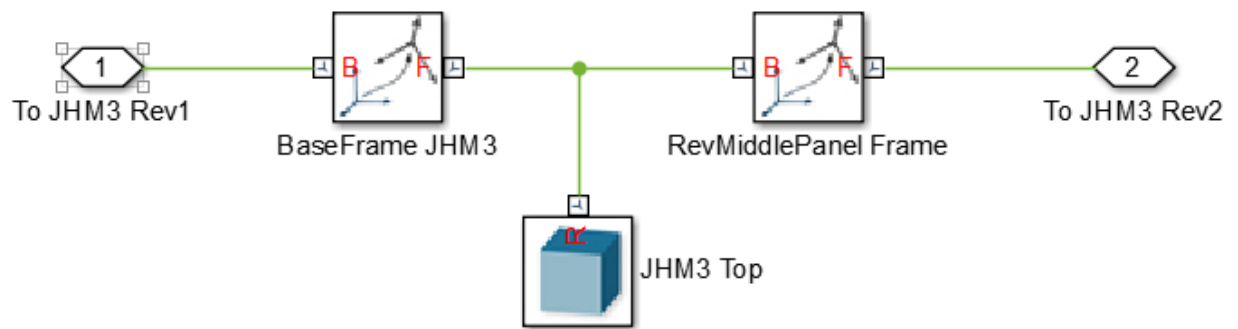


Fig. 20. JHM3 subsystem in Simulink

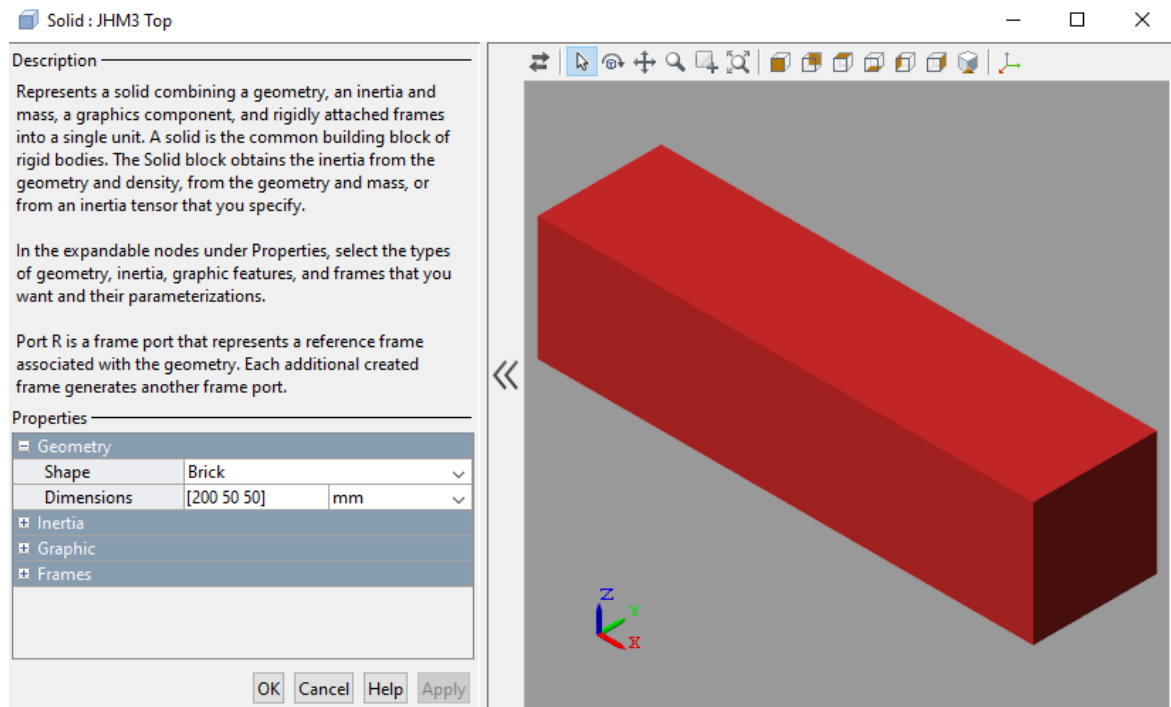


Fig. 21. JHM3 Solid block properties

### 3.5 Middle and side panels

On that stage of solar array wing developing was decided to model part that deployed horizontally. By doing so top and bottom side panel that deployed vertically both would be wedged. Therefore, besides rotational joints JHM5 and JHM6 between middle and side panels there would be angular constraints which would keep side panels wedged for duration of the simulation (Fig. 22).

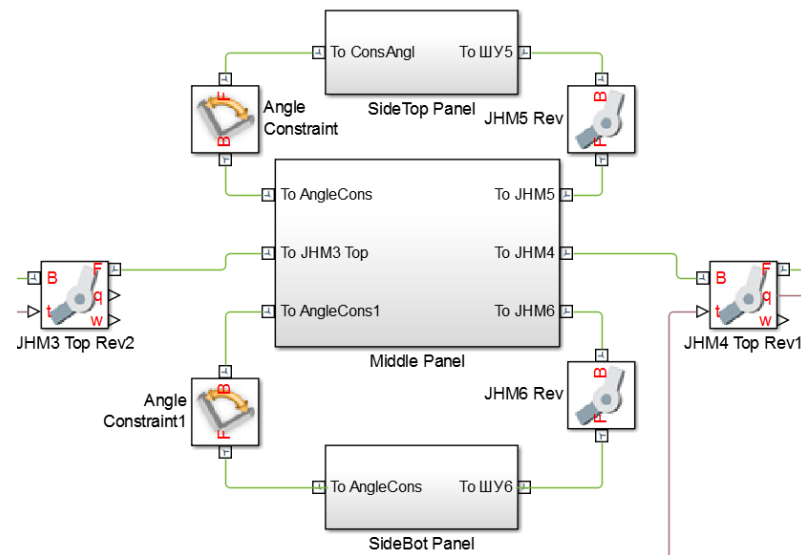


Fig. 22. SideTop Panel, SideBot Panel and Middle Panel subsystems with Angle Constraint blocks

Let us examine Middle Panel subsystem (Fig. 23). Base MiddlePanel Rigid Transform block is parent coordinate system for whole Middle panel subsystem. CG MiddlePanel is center of mass for Middle Panel Solid block which represents physical model of Middle panel subsystem.

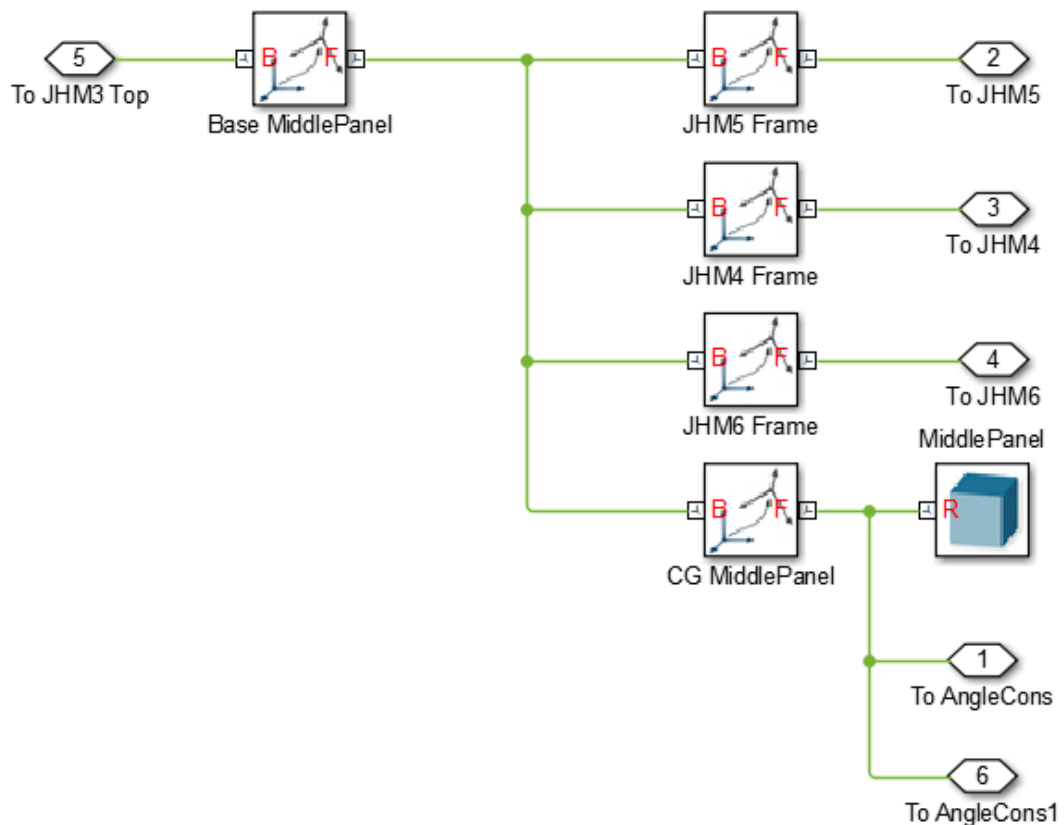


Fig. 23. Middle panel subsystem

JHM5 Frame and JHM6 Frame Rigid Transform blocks are bases in respect of which would be moving adjusted side panels subsystems with help of JHM5 Rev and JHM6 Rev joint blocks. JHM4 Frame is a base in respect of which would be moving adjusted last panel with help of JHM4 Top Rev1 joint block.

Outputs 1 (To AngleCons) and 6 (To AngleCons1) of the Middle panel subsystem leads to Angle Constraint blocks (Fig. 22), which restricts any rotational motions along Z axis. In our case coordinate systems which each constraint connects codirected and paralleled (Fig. 24).

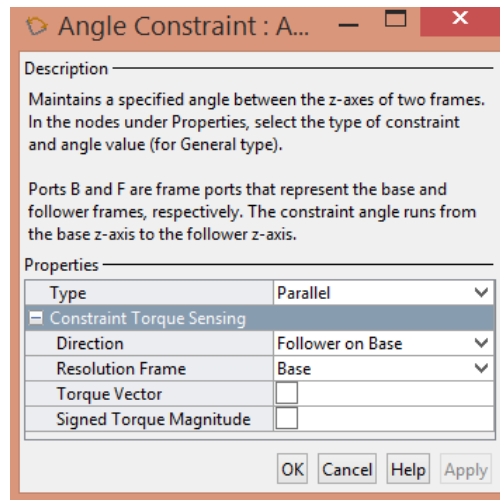


Fig. 24. Angle Constraint block properties

Let us examine Top Side panel subsystem (Fig. 25). Base MiddleTop Rigid Transform block is parent coordinate system for whole Top Side panel subsystem. CG MiddleTop is center of mass for MiddleTop Panel Solid block which represents physical model of Top Side panel subsystem. Second JHM5 Frame is center of mass for second JHM5.2 Solid block. JHM5 Solid block is a physical model of rotational joint between Middle and Top Side panels.

Structure of the Bottom Side panel subsystem is the same as Top Side panel except block names (Fig. 26).

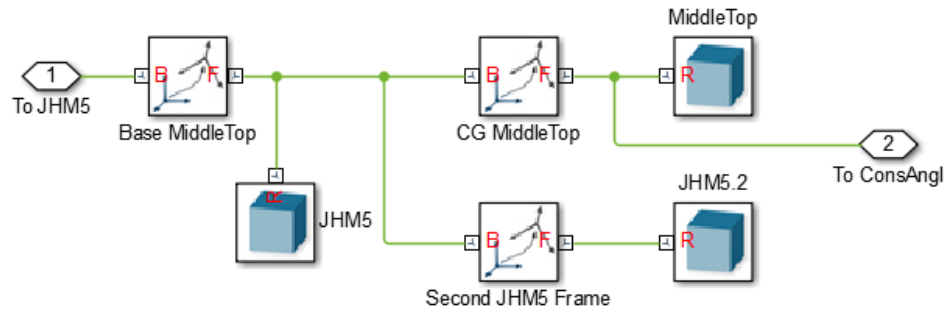


Fig. 25. Top Side panel subsystem

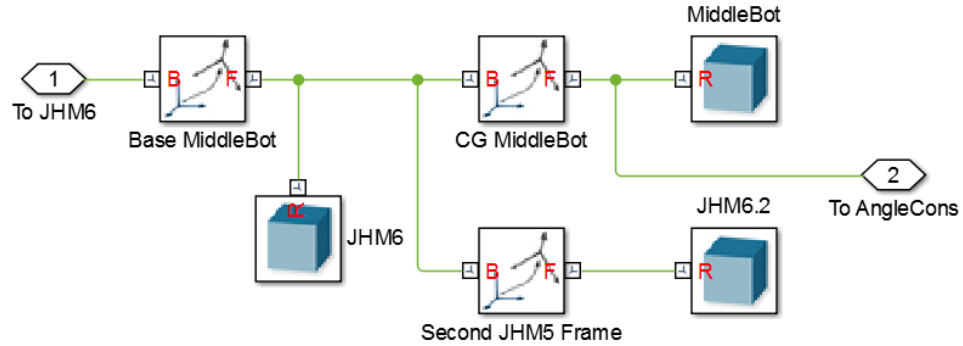


Fig. 26. Bottom Side panel subsystem

### 3.6 Forth joint-hinge mechanism

Structure and functions of the JHM4 subsystem is the same as JHM3 except block names and positions in space.

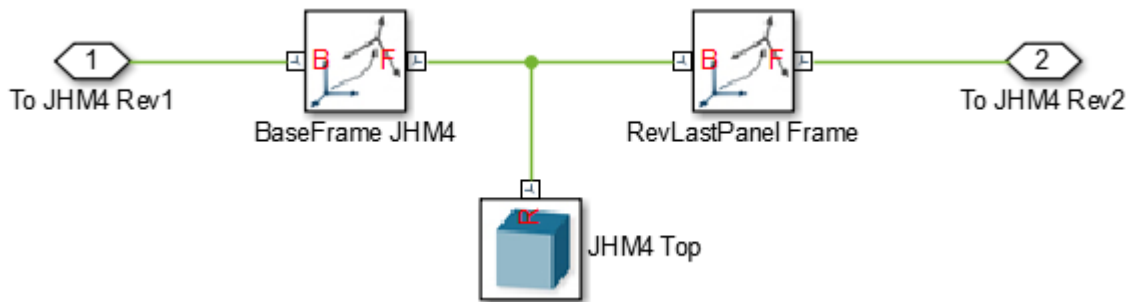


Fig. 27. JHM4 subsystem

### 3.7 Last panel

Figure 28 shows the model of the last panel in Simulink. Base LastPanel Rigid Transform block is parent coordinate system for whole Last panel subsystem. CG LastPanel is center of mass for LastPanel Solid block which represents physical model of Last panel subsystem.

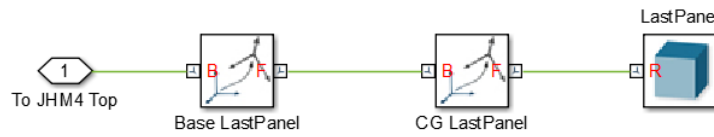


Fig. 28. Last panel subsystem

### 3.8 Final model

Final model with and without control system is shown in first supplement. Visualized solar array wing model in its folded, process of deployment and active states are shown on figures 29, 30 and 31.

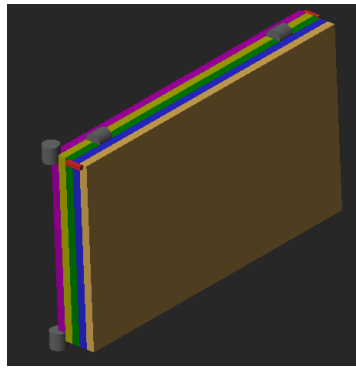


Fig. 29. Visualized solar array wing model in folded state

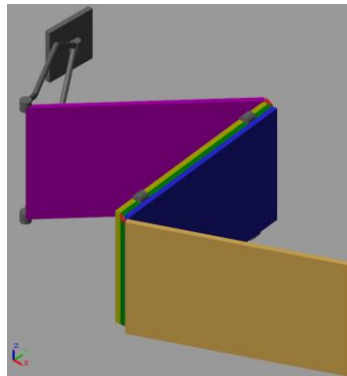


Fig. 30. Visualized solar array wing model in process of deployment

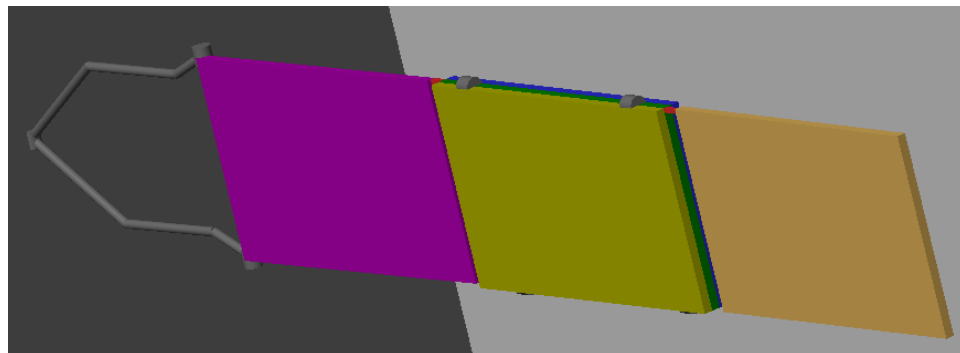


Fig. 30. Visualized solar array wing model in active state